

TUGAS AKHIR - TM 141585

# STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT PENEMPATAN PLAT DATAR PENGHALANG DI DEPAN RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN SAVONIUS

“Studi Kasus untuk  $L/D = 2$ ;  $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ; Bilangan  
Reynolds =  $3.0 \times 10^4$ ,  $6.0 \times 10^4$ , dan  $9.0 \times 10^4$ ”

AIP ABDUL LATIP  
NRP 2113 100 085

Dosen Pembimbing  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

JURUSAN TEKNIK MESIN  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2017



**TM141585 - TUGAS AKHIR**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT  
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGHALANG DI DEPAN  
*RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA TURBIN ANGIN  
SAVONIUS**

**“Studi Kasus untuk  $L/D = 2$ ;  $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ; Bilangan Reynolds =  $3.0 \times 10^4$ ,  $6.0 \times 10^4$ , dan  $9.0 \times 10^4$ ”**

Aip Abdul Latip  
NRP. 2113100085

Pembimbing:  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

PROGRAM SARJANA  
LABORATORIUM MEKANIKA DAN MESIN-MESIN FLUIDA  
DEPARTEMEN TEKNIK MESIN  
FAKULTAS TEKNOLOGI INDUSTRI  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017



## **TM141585 - FINAL ASSIGNMENT**

### **EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF ANGLE OF FLAT PLATE OBSTACLE IN FRONT OF RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE**

“Case Study for  $L/D = 2$ ;  $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ; Reynolds Number =  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , and  $9,0 \times 10^4$ .”

Aip Abdul Latip  
NRP. 2113100085

Advisor:  
Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

BACHELOR DEGREE  
FLUID MECHANICS AND TURBOMACHINERY LABORATORY  
MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
FACULTY OF INDUSTRIAL TECHNOLOGY  
INSTITUT TEKNOLOGI SEPULUH NOPEMBER  
SURABAYA  
2017

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT  
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGHALANG DI  
DEPAN *RETURNING BLADE* TERHADAP PERFORMA  
TURBIN ANGIN *SAVONIUS***

“Studi Kasus untuk  $(L/D) = 2$  ;  $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  ; Bilangan  
Reynolds =  $3 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9 \times 10^4$ ”

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh :

**AIP ABDUL LATIP**

**NRP. 2113 100 085**

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA  
(NIP. 196001291987011001) ..... (Pembimbing)
2. Prof. Ir. Sutardi, M.Eng. PhD  
(NIP. 196412281990031002) ..... (Penguji I)
3. Dr. Wawan Aries Widodo, ST. MT  
(NIP. 197104051997021001) ..... (Penguji II)
4. Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT  
(NIP. 196202161995121001) ..... (Penguji III)

**SURABAYA  
JULI 2017**

**STUDI EKSPERIMEN PENGARUH VARIASI SUDUT  
PENEMPATAN PLAT DATAR PENGHALANG DI DEPAN  
RETURNING BLADE TERHADAP PERFORMA TURBIN  
ANGIN SAVONIUS**

“Studi Kasus untuk  $L/D = 2$ ;  $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ; Bilangan  
Reynolds =  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .”

**Nama Mahasiswa** : Aip Abdul Latip  
**NRP** : 2113 100 085  
**Jurusan** : Teknik Mesin FTI-ITS  
**Dosen Pembimbing** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA.

**Abstrak**

*Persediaan sumber energi fosil sebagai sumber utama pemenuhan kebutuhan energi di bumi semakin menipis. Hal ini mendorong penggunaan sumber energi lain yang terbarukan seperti energi angin. Turbin angin Savonius dapat digunakan sebagai bentuk pemanfaatan energi angin menjadi energi listrik. Turbin ini bekerja dengan memanfaatkan perbedaan gaya drag yang timbul pada kedua sudu sehingga menghasilkan torsi yang dapat memutar poros generator listrik. Namun, turbin ini memiliki efisiensi yang rendah. Untuk meningkatkan performa turbin angin Savonius dapat dilakukan penambahan plat datar penghalang di depan returning blade untuk meningkatkan selisih gaya drag pada kedua sudu.*

*Penelitian dilakukan pada aliran eksternal dari axial fan dengan kapasitas aliran sebesar  $4413 \text{ ft}^3/\text{menit}$  terhadap benda uji turbin angin Savonius dengan diameter sudu  $D = 101,6 \text{ mm}$  dan tinggi  $H = 300 \text{ mm}$  yang terbuat dari bahan PVC. Plat datar berbahan acrylic dengan tebal  $3 \text{ mm}$  dan perbandingan lebar plat datar penghalang terhadap diameter sudut turbin  $L/D=2,0$  digunakan sebagai penghalang dan ditempatkan di depan returning blade. Sudut penempatan plat datar penghalang divariasikan tiap  $5^\circ$  dengan rentang  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ . Penelitian dilakukan pada aliran dengan bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ ,*

$6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$  berdasarkan panjang karakteristik turbin angin Savonius  $d=2D-b$  (dimana  $b$  adalah panjang overlap turbin angin Savonius) dan kecepatan aliran udara. Kecepatan aliran diatur menggunakan voltage regulator untuk mengatur kecepatan putar fan. Pengukuran kecepatan aliran digunakan menggunakan anemometer. Kecepatan putar dan torsi statis poros turbin diukur menggunakan tachometer dan torsimeter digital. Pengukuran torsi dinamis diukur menggunakan brake dynamometer dengan penambahan beban secara bertahap. Kemudian, dilakukan perhitungan perbandingan daya turbin dan daya kinetis angin.

Hasil penelitian menunjukkan bahwa dengan penambahan plat datar penghalang di depan turbin blade mampu meningkatkan performa turbin pada rentang sudut  $\theta > 10^\circ$ . Adapun, nilai coefficient of power tertinggi diperoleh pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan sudut penempatan plat penghalang  $\theta = 50^\circ$  sebesar 11,51% atau meningkat sebesar 2,22. Pada beberapa posisi penempatan plat penghalang, adanya plat penghalang justru menurunkan performa turbin angin Savonius akibat terbentuknya wake di belakang plat penghalang.

**Kata kunci :** *coefficient of power, putaran turbin, sudut plat penghalang, torsi dinamis, torsi statis, dan turbin angin Savonius.*

# EXPERIMENTAL STUDY ON THE EFFECT OF ANGLE OF FLAT PLATE OBSTACLE IN FRONT OF RETURNING BLADE TO THE SAVONIUS WIND TURBINE PERFORMANCE

“Case Study for  $L/D = 2$ ;  $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ ; Reynolds Number =  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , and  $9,0 \times 10^4$ .”

**Student's Name** : Aip Abdul Latip  
**NRP** : 2113 100 085  
**Department** : Mechanical Engineering FTI-ITS  
**Advisor** : Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA

## Abstract

*The fossil fuel as the main source to fulfill the world's energy needs is running out of supply. This situation forces us, as human being, to shift over the use of fossil fuel to another renewable energy resource like wind energy. The Savonius wind turbine can be used to utilize the wind energy to generate electricity. This turbine moves using drag force difference that produces torque and rotates the generator shaft. Unfortunately, the Savonius wind turbine has a rather poor efficiency. Placing a flat plate obstacle in front of the returning blade can be used to obtain a higher Savonius wind turbine performance.*

*The present study was done in an external flow, where the freestream velocity was supplied by an axial fan having a flow capacity of  $4413 \text{ ft}^3/\text{min}$ . The turbine was made of PVC having 101,6 mm blade diameter and a height of 300 mm. A flat plate was made from an acrylic with  $L/D$  ratio of 2 and has a width of 3 mm, placed in front of the returning blade. The angle position was varied in range of  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  with  $5^\circ$  increment. The present study was done in Reynolds number of  $Re = 3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$  based on turbine's characteristic length  $d = 2D - b$  (where  $b$  is turbine's overlap length) and the free stream velocity. The free stream velocity was measured using anemometer. The rotational speed was measured using a tachometer and the static torque was measured using a torque*

*meter. As for the dynamic torque, the measurement was done using a brake dynamometer system with gradual load.*

*The results show that the presence of a flat plate obstacle in front of returning blade gave the turbine a better performance in angle range  $\theta > 10^\circ$ . The highest coefficient of power was obtained at Reynolds number of  $6,0 \times 10^4$  and  $\theta = 50^\circ$  at the value of 11,51%, or attained a 2,22 increment than without an obstacle. At some range of angle, the presence of flat plate obstacle will decrease the performance of the wind turbine instead of increasing it. It was due to the wake that formed behind the flat plate obstacle and disrupt the air flow.*

***Keywords: coefficient of power, dynamic torque, flat plate angle, rotational speed, Savonius wind turbine, and static torque.***



## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan ke hadirat Allah SWT yang telah memberikan rahmat dan karuniaNya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir ini sekaligus sebagai penutup manis perantaraan penulis menimba ilmu di Surabaya. Dalam pengerjaan tugas akhir ini, banyak sekali pihak yang membantu penulis untuk menyelesaikannya. Untuk itu penulis mengucapkan banyak terima kasih, khususnya kepada:

1. Orang tua dan keluarga di rumah, Alm. Bapak Arifin Syarifudin dan Ibu Aat Supiati serta kakak-kakk yang terus memberikan semangat dan doa dari rumah. Suasana hangat di rumah menjadi motivasi terkuat penulis untuk menyelesaikan studinya tepat waktu.
2. Dosen pembimbing tugas akhir ini, Prof. Dr. Ir. Triyogi Yuwono, DEA, yang tidak henti memberikan pengampunan kepada mahasiswanya dan memberikan arahan penulis untuk menyelesaikan tugas-tugas kehidupan yang tak ada habisnya.
3. Para dosen penguji, Prof. Ir. Sutardi M.Eng., PhD., Dr. Wawan Aries Widodo, ST., MT., dan Dr. Ir. Heru Mirmanto, MT., yang telah banyak memberikan masukan sehingga tugas akhir ini dapat ditulis dengan sebaik-baiknya.
4. Dr. Wiwiek Hendrowati, S.T, M.T selaku dosen wali penulis dan seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Mesin FTI-ITS serta tak lupa, Kepala Departemen Teknik Mesin FTI-ITS, Ir. Bambang Pramujati, M.Eng.Sc., Ph.D., yang banyak membantu penulis selama menjalankan studinya.
5. Erik Noer Mazhlina, *partner* terbaik yang terus menemani dan membangun semangat untuk meraih *tons of milestones ahead of us*. Semoga tetap semangat untuk mencapai *milestones* selanjutnya di depan.
6. Rekan-rekan seperjuangan Savonius 3 generasi, terima kasih atas bantuan, keluh kesah, perselisihan dan semangatnya selama mengerjakan tugas akhir ini.

7. Warga Ijo beserta seluruh isinya yang telah membagikan tawa dan tiwinya sebagai penyembuh lara penulis dikala suntuk.
8. PT. Indofood Sukses Makmur Tbk. Dan PT. Gudang Garam Tbk. sebagai penyuplai suntikan energi tambahan dikala penulis terhempit keadaan.
9. Rekan-rekan Himpunan Mahasiswa Mesin, Departemen Hubungan Luar, dan Teknik Mesin Angkatan 2013 yang telah banyak memberikan warna kehidupan dalam 4 tahun terakhir di Surabaya.
10. Seluruh pihak yang tak bisa penulis sebutkan satu-persatu baik yang sudah, sempat, atau pun yang belum bisa penulis sampaikan rasa terima kasihnya. Semoga bantuan kalian kembali menjadi kebaikan bagi kalian.

Penulis menyadari bahwa manusia hanyalah makhluk yang tak luput dari lupa dan khilaf. Untuk itu penulis mengharapkan kritik dan saran yang membangun demi menyempurnakan laporan tugas akhir ini. Terakhir, penulis meminta maaf apabila terdapat kalimat yang kurang berkenan pada laporan tugas akhir ini. Penulis berharap semoga laporan tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi penulis dan seluruh pembaca untuk kemajuan yang lebih baik.

Surabaya, Juli 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

<b>ABSTRAK</b> .....	i
<b>ABSTRACT</b> .....	iii
<b>KATA PENGANTAR</b> .....	v
<b>DAFTAR ISI</b> .....	vii
<b>DAFTAR GAMBAR</b> .....	xi
<b>DAFTAR TABEL</b> .....	xvii
<b>BAB I PENDAHULUAN</b> .....	1
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah.....	3
1.3 Batasan Masalah.....	5
1.4 Tujuan Penelitian.....	5
1.5 Manfaat Penelitian.....	6
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b> .....	7
2.1 Turbin Angin Savonius.....	7
2.2 Gaya Hambat.....	9
2.3 Daya Pada Turbin.....	11
2.4 Tip Speed Ratio.....	14
2.5 Bilangan Reynolds.....	17
2.6 Blockage Effect.....	19
2.7 Penelitian Terdahulu.....	20
2.7.1 Analisis Numerik Optimalisasi Turbin Angin Savonius Menggunakan Plat Penghalang.....	21
2.7.2 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius Dengan Plat Penghalang Pada Aliran Eksternal.....	23
2.7.3 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius Dengan Plat Penghalang Pada <i>Subsonic Wind Tunnel</i> .....	25
2.7.4 Studi Numerik Turbin Angin Savonius 2 Sudu dan 3 Sudu dengan Variasi Kecepatan Aliran Udara.....	28
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b> .....	33
3.1 Skema Penelitian.....	33

3.2	Analisis Dimensi .....	34
3.3	Peralatan yang Digunakan.....	37
3.3.1	Axial Fan dan Voltage Regulator .....	37
3.3.2	Honeycomb.....	38
3.3.3	Benda Uji .....	39
3.3.4	Alat Ukur .....	40
3.3.5	Pelumas.....	47
3.4	Pengaturan Analisis Numerik .....	47
3.5	Prosedur Penelitian .....	50
3.6	Flowchart Penelitian .....	51
3.7	Alokasi Waktu Penelitian.....	54
<b>BAB IV</b>	<b>ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN .....</b>	<b>57</b>
4.1	Kecepatan Aliran Udara.....	57
4.2	Contoh Perhitungan.....	58
4.2.1	Perhitungan Torsi Dinamis .....	59
4.2.2	Perhitungan Coefficient of Power.....	59
4.2.3	Perhitungan Tip Speed Ratio .....	60
4.3	Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang .....	60
4.3.1	Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang .....	61
4.3.2	Analisis Kecepatan Putar Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang .....	62
4.3.3	Analisis <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang .....	63
4.4	Analisis Performa Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan <i>Returning Blade</i> .....	66
4.4.1	Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan <i>Returning Blade</i> .....	66
4.4.2	Analisis Kecepatan Putar Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan <i>Returning Blade</i> .....	70

4.4.3	Analisis <i>Coefficient of Power</i> Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan <i>Returning Blade</i> .....	79
4.5	Komparasi Hasil Eksperimen Dengan Penelitian Sebelumnya.....	85
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN</b> .....	89
5.1	Kesimpulan .....	89
5.2	Saran .....	90
	<b>DAFTAR PUSTAKA</b> .....	93
	<b>LAMPIRAN</b> .....	95

*“ halaman ini sengaja dikosongkan ”*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Skema turbin angin Savonius .....	8
<b>Gambar 2.2</b>	Penguraian komponen gaya hambat dan gaya angkat.....	9
<b>Gambar 2.3</b>	Gerak berputar pada sebuah roda gigi ( <b>Wickert, 2013</b> ).....	13
<b>Gambar 2.4</b>	Penguraian komponen gaya pada piringan <i>brake dynamometer</i> .....	13
<b>Gambar 2.5</b>	<i>Tip speed ratio</i> pada turbin angin Savonius .....	15
<b>Gambar 2.6</b>	Diagram <i>power coefficient</i> terhadap <i>tip speed ratio</i> ( <b>Ragheb, 2011</b> ).....	16
<b>Gambar 2.7</b>	<i>Boundary layer</i> sebuah aliran di atas plat datar.	17
<b>Gambar 2.8</b>	Nilai <i>blockage correction factor</i> untuk beberapa jenis <i>body</i> ( <b>Ian, 2010</b> ).....	20
<b>Gambar 2.9</b>	Skema penelitian plat penghalang pada turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu ( <b>Mohamed et al, 2010</b> ) .....	21
<b>Gambar 2.10</b>	Koefisien torsi statis pada turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu ( <b>Mohamed et al, 2010</b> )	22
<b>Gambar 2.11</b>	Koefisien daya pada turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu ( <b>Mohamed et al, 2010</b> ) .....	23
<b>Gambar 2.12</b>	Skema penelitian turbin angin Savonius dengan plat pengarah dan plat penghalang ( <b>Altan et al, 2008</b> ).....	23
<b>Gambar 2.13</b>	<i>Power coefficient</i> yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan dan tanpa plat penghalang ( <b>Altan et al, 2008</b> ).....	24
<b>Gambar 2.14</b>	Grafik putaran terhadap sudut plat penghalang turbin angin Savonius ( <b>Setyanto, 2016</b> ).....	25
<b>Gambar 2.15</b>	Grafik perbandingan putaran turbin ( $n/n_o$ ) terhadap sudut plat datar pengganggu di turbin angin Savonius ( <b>Setyanto, 2016</b> ) .....	26

<b>Gambar 2.16</b>	Grafik perbandingan torsi statis ( $T/T_0$ ) terhadap sudut plat data pengganggu di turbin angin Savonius ( <b>Setyanto, 2016</b> ) .....	26
<b>Gambar 2.17</b>	(a) Grafik nilai <i>coefficient of power</i> dan (b) kenaikan <i>coefficient of power</i> dibandingkan dengan kondisi tanpa pla penghalang ( <b>Setyanto, 2016</b> ).....	27
<b>Gambar 2.18</b>	Geometri turbin angin Savonius (a) dua sudu dan (b) tiga sudu ( <b>Sunandi, 2016</b> ) .....	29
<b>Gambar 2.19</b>	Grafik torsi terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius ( <b>Sunandi, 2016</b> ).....	30
<b>Gambar 2.20</b>	Grafik koefisien daya terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius ( <b>Sunandi, 2016</b> ).....	30
<b>Gambar 3.1</b>	Skema benda uji.....	33
<b>Gambar 3.2</b>	Skema penelitian.....	34
<b>Gambar 3.3</b>	<i>Axial Fan</i> CKE SPV-18 .....	38
<b>Gambar 3.4</b>	Skema <i>honeycomb</i> .....	39
<b>Gambar 3.5</b>	Skema turbin angin Savonius .....	39
<b>Gambar 3.6</b>	Skema plat penghalang .....	40
<b>Gambar 3.7</b>	Anemometer Digital Omega HHF-141A.....	41
<b>Gambar 3.8</b>	Tachometer OMEGA HHT-12 .....	42
<b>Gambar 3.9</b>	Torsimeter LUTRON TQ-8800 .....	43
<b>Gambar 3.10</b>	Skema pengukuran <i>brake dynamometer</i> : (a) Skema desain awal; (b) Foto dari skema <i>brake dynamometer</i> .....	44
<b>Gambar 3.11</b>	(a) neraca pegas dan (b) pemberat .....	45
<b>Gambar 3.12</b>	Timbangan Shimadzu ELB 300.....	45
<b>Gambar 3.13</b>	SANWA PC7000 Digital Multimeter .....	46
<b>Gambar 3.14</b>	REXCO 50 Multipurpose Lubricant.....	47
<b>Gambar 3.15</b>	Geometri simulasi turbin angin Savonius .....	47
<b>Gambar 3.16</b>	<i>Meshing</i> turbin angin Savonius.....	48
<b>Gambar 3.17</b>	<i>Boundary condition</i> simulasi turbin angin Savonius.....	48
<b>Gambar 4.1</b>	Torsi statis turbin angin savonius tanpa plat penghalang .....	61



<b>Gambar 4.2</b>	Kecepatan putar turbin angin Savonius tanpa plat penghalang.....	62
<b>Gambar 4.3</b>	<i>Coefficient of power</i> turbin angin savonius tanpa plat penghalang.....	63
<b>Gambar 4.4</b>	<i>Coefficient of power</i> turbin angin savonius tanpa plat penghalang pada beragam bilangan Reynolds .....	64
<b>Gambar 4.5</b>	Pengaruh <i>tip speed ratio</i> terhadap <i>coefficient of power</i> turbin angin Savonius tanpa plat penghalang.....	65
<b>Gambar 4.6</b>	Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap torsi statis turbin angin Savonius .....	67
<b>Gambar 4.7</b>	Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kenaikan nilai torsi statis turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa plat penghalang.....	68
<b>Gambar 4.8</b>	Pengaruh posisi bukaan sudu turbin terhadap torsi statis turbin angin Savonius .....	69
<b>Gambar 4.9</b>	Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kecepatan putar turbin angin Savonius.....	71
<b>Gambar 4.10</b>	Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kenaikan nilai torsi statis turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa plat penghalang.....	72
<b>Gambar 4.11</b>	Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=0^\circ$ pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	74
<b>Gambar 4.12</b>	Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=0^\circ$ pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	74
<b>Gambar 4.13</b>	Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat	

	penghalang $\theta=50^\circ$ pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	75
<b>Gambar 4.14</b>	Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=50^\circ$ pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	75
<b>Gambar 4.15</b>	Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=0^\circ$ pada bilangan Reynolds $3,0 \times 10^4$ .....	76
<b>Gambar 4.16</b>	Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=0^\circ$ pada bilangan Reynolds $3,0 \times 10^4$ .....	76
<b>Gambar 4.17</b>	Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=90^\circ$ pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	78
<b>Gambar 4.18</b>	Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=90^\circ$ pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	78
<b>Gambar 4.19</b>	Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius tanpa plat penghalang pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	79
<b>Gambar 4.20</b>	Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius tanpa plat penghalang pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	79
<b>Gambar 4.21</b>	Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap <i>coefficient of power</i> turbin angin Savonius .....	80
<b>Gambar 4.22</b>	<i>Coefficient of power</i> turbin angin savonius dengan dan tanpa plat penghalang pada beragam bilangan Reynolds .....	81

<b>Gambar 4.23</b>	Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kenaikan nilai <i>coefficient of power</i> turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa plat penghalang.....	82
<b>Gambar 4.24</b>	Pengaruh <i>tip speed ratio</i> terhadap <i>coefficient of power</i> turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang $\theta=50^\circ$ dibandingkan dengan tanpa plat penghalang pada bilangan Reynolds $9,0 \times 10^4$ .....	84
<b>Gambar 4.25</b>	Perbandingan nilai <i>coefficient of power</i> hasil eksperimen dengan penelitian <b>Setyanto (2016)</b>	86

*“ halaman ini sengaja dikosongkan ”*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b>	Nilai <i>coefficient of drag</i> pada beberapa bentuk benda ( <b>Pritchard, 2011</b> ) .....	10
<b>Tabel 2.2</b>	Posisi optimal plat penghalang ( <b>Mohamed et al, 2010</b> ) .....	21
<b>Tabel 2.3</b>	Konfigurasi dimensi plat penghalang ( <b>Altan et al, 2008</b> ) .....	24
<b>Tabel 3.1</b>	Dimensi primer parameter .....	35
<b>Tabel 3.2</b>	Spesifikasi <i>Axial Fan</i> CKE SPV-18 .....	38
<b>Tabel 3.3</b>	Spesifikasi Anemometer Digital Omega HHF-141A .....	41
<b>Tabel 3.4</b>	Spesifikasi Tachometer Digital OMEGA HHT-12 .....	42
<b>Tabel 3.5</b>	Spesifikasi Torsimeter LUTRON TQ-8800 .....	43
<b>Tabel 3.6</b>	Spesifikasi Pegas .....	44
<b>Tabel 3.7</b>	Spesifikasi Benang Nilon DAMYL.....	44
<b>Tabel 3.8</b>	Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB 300 .....	45
<b>Tabel 3.9</b>	Spesifikasi multimeter digital SANWA PC7000 .....	46
<b>Tabel 3.10</b>	Pemodelan simulasi turbin angin Savonius .....	49
<b>Tabel 4.1</b>	Kecepatan aliran udara pada tiga bilangan Reynolds .....	58
<b>Tabel 4.2</b>	Data pengukuran pada kondisi $Re = 6,0 \times 10^4$ dan $\theta = 50^\circ$ .....	59
<b>Tabel 4.3</b>	Data peforma turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang.....	61

*“ halaman ini sengaja dikosongkan ”*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Populasi manusia di bumi terus mengalami peningkatan dari tahun ke tahun. Tercatat pada 2016 populasi manusia di bumi berjumlah 7,4 miliar jiwa. Jumlah ini meningkat 0,1 miliar jiwa dari 2014 hingga 2015. Diperkirakan populasi manusia di bumi akan mencapai 9,9 miliar jiwa pada 2050. Dengan meningkatnya jumlah populasi di bumi maka akan terjadi peningkatan konsumsi energi. Sebuah analisis rinci untuk Badan Energi Denmark menghitung bahwa untuk memasok kebutuhan energi populasi dunia pada tahun 2050 membutuhkan enam kali lipat kebutuhan energi dunia pada tahun 2000. **(Meadows, 2002).**

Muncul keresahan bahwa umat manusia akan mengalami krisis energi di masa mendatang. Sampai saat ini manusia masih sangat bergantung dengan sumber energi fosil yang persediannya di bumi semakin menipis. Pada tahun 2000, lebih dari 80% kebutuhan energi dipenuhi menggunakan sumber energi fosil **(Meadows, 2002)**. Namun, manusia terus beradaptasi untuk memenuhi kebutuhan energinya dengan berbagai cara. Salah satunya ialah penggunaan energi angin sebagai energi terbarukan yang menunjang pemanfaatan energi yang *sustainable*.

Peningkatan kebutuhan energi di dunia juga turut terjadi di Indonesia. Pada sektor listrik, konsumsi listrik di Indonesia di tahun 2015 mencapai 124.344 *Thousand BOE (Barrel of Equivalent Oil)* atau setara dengan 211 ribu GWh. Jumlah ini mengalami peningkatan sebesar 37% sejak 5 tahun terakhir. **(Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia, 2016)**. Dengan kebutuhan energi yang tinggi tersebut, pemenuhan energi dengan energi angin masih sangat sedikit.

Pemanfaatan energi angin sebagai energi listrik dapat diaplikasikan pada penggunaan turbin angin yang menghasilkan putaran untuk menggerakkan poros pada generator listrik. Salah satu jenis turbin angin yang ada ialah turbin angin Savonius. Turbin

angin jenis ini berbentuk potongan silinder yang diletakkan dengan sumbu putar ke arah vertikal. Turbin angin jenis ini memiliki dua jenis sudu yang disebut *advancing blade* dan *returning blade*. Turbin angin Savonius bekerja dengan memanfaatkan perbedaan gaya *drag* yang timbul pada masing-masing sudu sehingga menghasilkan torsi dan memutar poros turbin. Turbin angin jenis ini memiliki efisiensi yang lebih rendah dibanding turbin angin jenis lainnya namun mampu beroperasi pada kecepatan angin yang cukup rendah. Hal ini cocok dengan kondisi angin di wilayah Indonesia yang memiliki rata-rata kecepatan angin yang cukup rendah.

**Altan et Al (2008)** telah melakukan percobaan untuk mengamati pengaruh pemberian plat penghalang dan plat pengarah di depan *returning blade* dan *advancing blade* terhadap performanya. Dalam percobaan ini digunakan turbin angin Savonius konvensional dengan variasi panjang dan sudut dari plat penghalang dan plat pengarah. Hasil percobaan menunjukkan bahwa penambahan plat penghalang dan plat pengarah pada turbin angin Savonius mampu meningkatkan *coefficient of power* (CoP) dibandingkan tanpa plat penghalang dan plat pengarah. Peningkatan maksimum sebesar 38% didapatkan pada penggunaan plat penghalang dan plat pengarah yang paling panjang yaitu  $l_1 = 45 \text{ cm}$  dan  $l_2 = 52 \text{ cm}$  dengan sudut optimum untuk masing-masing plat sebesar  $\alpha = 45^\circ$  dan  $\beta = 15^\circ$ .

Pada penelitian lebih lanjut dengan menggunakan simulasi software, **Mohamed et al (2010)** melakukan simulasi *computation fluid dynamic (CFD)* optimasi turbin angin Savonius dengan menambahkan *shielding obstacle* berupa plat datar yang menghalangi *returning blade*. Variasi dilakukan terhadap sudut *shielding obstacle* yang ditambahkan pada turbin angin Savonius dengan 2 sudu dan 3 sudu. Hasil penelitian ini menunjukkan bahwa penambahan *shielding obstacle* mampu meningkatkan kemampuan *self-starting* pada hampir semua konfigurasi variasi. Penambahan *shielding obstacle* juga meningkatkan *output power coefficient* sebesar 27,3% pada turbin 2 sudu dan 27,5% pada turbin 3 sudu.



**Setyanto (2016)** juga melakukan percobaan terhadap turbin angin Savonius untuk menganalisis pengaruh pemberian plat penghalang berupa plat datar yang ditempatkan di depan *returning blade*. Percobaan dilakukan menggunakan turbin angin Savonius 2 sudu dengan diameter sudu turbin 60 mm dan tinggi 80 mm. Dari percobaan ini didapatkan nilai putara turbin, torsi statis, dan *coefficient of power* pada turbin angin dengan plat penghalang mengalami peningkatan. Sudut optimum didapatkan pada nilai  $\alpha = 50^\circ$  yang meningkatkan nilai putaran poros hingga 2,89 kali lipat dan nilai *coefficient of power* hingga 22,4 kali lipat dibanding tanpa menggunakan plat penghalang pada *Reynolds number*  $6,0 \times 10^4$ . Namun, percobaan ini mengalami kelemahan yaitu timbulnya *blockage effect* karena rasio antara ukuran benda uji dan *test section* yang terlalu besar. Pada percobaan ini turbin angin Savonius ditempatkan pada sebuah *subsonic wind tunnel* dimensi *test section* 304 mm x 304 mm.

Dari banyak referensi di atas dirasa masih perlu dilakukan penelitian untuk mendapatkan peningkatan efisiensi dan kemampuan unjuk daya dari turbin angin Savonius. Dalam studi eksperimen ini akan digunakan turbin angin Savonius konvensional dengan dua sudu turbin yang akan dianalisis performanya ketika diberikan penghalang berupa plat datar di depan *returning blade*. Variasi konfigurasi plat penghalang dilakukan dengan mengatur sudut plat penghalang dari  $0^\circ$  sampai  $90^\circ$  dengan kelipatan tiap  $5^\circ$  pada *Reynolds number*  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .

## 1.2 Rumusan Masalah

Turbin angin Savonius memiliki desain yang sederhana namun memiliki efisiensi yang rendah. Peningkatan efisiensi turbin angin Savonius dapat dilakukan dengan memberikan plat penghalang di depan *returning blade* turbin angin Savonius. Pemberian plat penghalang ini bertujuan untuk memperkecil gaya drag yang terjadi pada *returning blade* sehingga perbedaan gaya drag yang terjadi menjadi besar. Akibatnya torsi yang memutar

rotor turbin angin Savonius akan semakin besar. Dengan semakin besarnya torsi maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Plat penghalang di depan *returning blade* dipasang dengan variasi sudut tertentu dengan harapan agar plat penghalang juga mengarahkan aliran fluida ke *advancing blade*. Aliran fluida yang mengalir menuju *returning blade* akan menabrak plat penghalang dan diarahkan menuju *advancing blade* sehingga aliran fluida pada *advancing blade* akan semakin banyak dan memperbesar gaya drag pada *advancing blade*. Dengan adanya peningkatan gaya drag pada *advancing blade* maka selisih gaya drag antara *advancing blade* dan *returning blade* akan semakin besar. Torsi yang akan memutar rotor turbin angin Savonius juga akan semakin besar sehingga daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.

Pada penelitian ini digunakan turbin angin Savonius dengan dua sudu dan diberi plat penghalang berbentuk persegi panjang dengan variasi sudut antara plat penghalang dan bidang tegak lurus arah gerak aliran fluida. Hipotesa awal yang diharapkan pada penelitian ini adalah sebagai berikut:

1. Pemberian plat penghalang di depan *returning blade* turbin angin Savonius diharapkan akan menurunkan gaya drag yang dialami oleh *returning blade*. Menurunnya gaya drag pada *returning blade* akan menyebabkan meningkatnya torsi pada rotor turbin angin Savonius. Dengan meningkatnya torsi maka daya yang dihasilkan juga akan semakin besar.
2. Variasi sudut dari plat penghalang dapat berpengaruh terhadap gaya drag dari *advancing blade*, yaitu untuk mengarahkan aliran udara dari sisi *upstream* ke *advancing blade* sehingga akan menambah gaya drag pada sisi *advancing blade*. Selisih gaya drag antara *returning blade* dan *advancing blade* akan semakin besar hingga mencapai sudut optimumnya.
3. Posisi bukaan plat penghalang yang melebihi sudut optimum akan mengakibatkan selisih gaya drag antara kedua sudu menurun. Hal ini dikarenakan aliran udara yang menerobos dari ujung plat penghalang memberikan gaya drag pada

*returning blade* yang melawan torsi akibat gaya drag pada *advancing blade*.

Untuk membuktikan hipotesa diatas maka dilakukan penelitian dengan menggunakan turbin angin Savonius dengan diameter sudu ( $D$ ) = 101,6 mm serta plat penghalang berbentuk persegi panjang dengan nilai  $L/D = 2$ . Sudut dari plat penghalang divariasikan pada rentang sudut  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  dengan kelipatan  $5^\circ$  pada nilai *Reynolds Number*  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .

### 1.3 Batasan Masalah

Untuk dapat menjawab perumusan masalah di atas, digunakan beberapa batasan masalah dalam penelitian ini. Adapaun batasan-batasan masalah tersebut yaitu sebagai berikut:

1. Analisis dilakukan pada turbin angin Savonius dengan diameter ( $D$ ) sebesar 101,6 mm.
2. Plat penghalang berupa plat datar *acrylic* diletakkan di depan *returning blade* dengan dimensi: tebal 3 mm, tinggi 150 mm, dan panjang ( $L$ ) sebesar 203,2 mm.
3. Variasi kemiringan plat penghalang pada rentang sudut  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  dengan kelipatan  $5^\circ$ .
4. Aliran fluida berupa udara yang mengalir dalam kondisi *steady*, *incompressible*, dan *uniform* pada sisi *upstream* dengan bilangan Reynolds sebesar  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .
5. Penelitian dilakukan menggunakan aliran satu arah.

### 1.4 Tujuan Penelitian

Penelitian ini bertujuan untuk mengetahui pengaruh pemberian plat penghalang di depan *returning blade* terhadap performa turbin angin Savonius. Adapun, analisis performa tersebut dilakukan dengan cara sebagai berikut:

1. Mengukur kecepatan putaran turbin angin Savonius ketika diberi aliran udara dengan Reynolds Number  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .

2. Mengukur nilai torsi statis turbin angin Savonius ketika diberi aliran udara dengan Reynold Number  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .
3. Mengukur nilai torsi dinamis turbin angin Savonius ketika diberi aliran udara dengan Reynold Number  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .
4. Menghitung nilai *Coefficient of Power* (CoP) turbin angin Savonius.

### 1.5 Manfaat Penelitian

Adapun manfaat yang didapat dari penelitian ini yaitu sebagai berikut:

1. Memberikan penjelasan mengenai pengaruh pemberian plat penghalang terhadap nilai torsi, putaran dan *coefficient of power* turbin angin Savonius.
2. Memberikan penjelasan mengenai pengaruh sudut antara plat penghalang dan bidang tegak lurus aliran fluida terhadap nilai torsi, putaran dan *coefficient of power* turbin angin Savonius.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

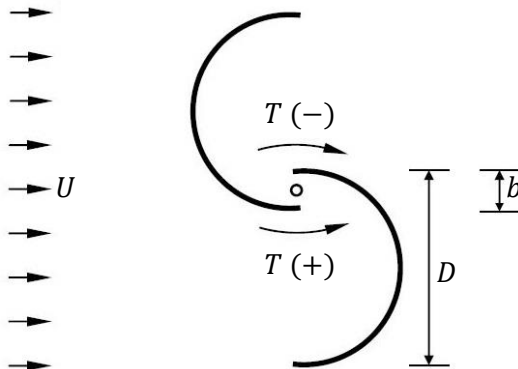
### 2.1 Turbin Angin Savonius

Sejak penggunaan energi angin untuk menghasilkan energi listrik dikenal pada awal tahun 1900-an, turbin angin terus mengalami pengembangan desain dan sistem. Secara umum turbin angin dapat dikelompokkan menjadi 2 jenis berdasarkan sumbu putarnya, yaitu turbin angin dengan sumbu putar horizontal atau dikenal dengan istilah *Horizontal Axis Wind Turbines* (HAWT) dan turbin angin dengan sumbu putar vertikal atau dikenal dengan istilah *Vertical Axis Wind Turbines* (VAWT). Baik HAWT maupun VAWT memiliki kelebihan dan kekurangan serta karakteristik turbinnya masing-masing.

HAWT memiliki sumbu putar horizontal terhadap permukaan tanah dan sejajar arah aliran angin. Turbin jenis ini memiliki *cut-in wind speed* yang rendah namun untuk menyesuaikan arah angin diperlukan sebuah *tail* atau alat pengoleng sehingga perlu pertimbangan desain tambahan. Karena posisi poros yang berada di atas maka *housing* generator dan *gearbox* pun berada di atas sehingga desainnya lebih rumit dan mahal. Berdasarkan jumlah sudunya, HAWT dapat dibedakan menjadi *single bladed*, *two bladed*, *three bladed*, dan *multi bladed*. Semakin banyak jumlah *blade* yang dimiliki maka kemampuan *self starting* semakin baik namun memperbesar kerugian aerodinamis. *Multi bladed turbine* digunakan pada sistem yang membutuhkan torsi awal yang besar seperti pompa air.

Berbeda dengan HAWT, VAWT memiliki sumbu putar yang vertikal terhadap permukaan tanah. Sumbu tersebut tegak lurus terhadap arah aliran angin yang melaluinya. Kelebihan turbin jenis ini ialah kemampuannya untuk menerima angin dari segala arah sehingga alat pengoleng tidak lagi diperlukan. *Housing* generator dan *gearbox* dapat ditempatkan pada permukaan tanah sehingga desain VAWT umumnya lebih sederhana dan ekonomis. Kelemahan dari VAWT ialah kemampuan *self starting* yang buruk.

Beberapa desain VAWT ialah turbin angin Darrieus, turbin angin Musgrove, dan turbin angin Savonius.



**Gambar 2.1** Skema turbin angin Savonius

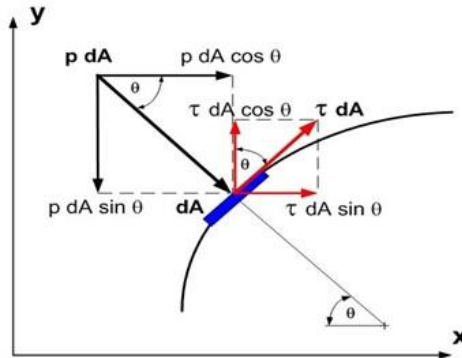
Turbin angin Savonius dikembangkan oleh insinyur asal Finlandia, Sigurd Johannas Savonius pada tahun 1922. Turbin angin Savonius tersusun atas 2 sudu berbentuk setengah silinder yang disusun berseling sehingga membentuk 'S'. Sudu yang menerima aliran angin pada permukaan cekung disebut *advancing blade*, sedangkan sudu yang menerima aliran angin pada permukaan cembung disebut *returning blade*. Perbedaan bentuk permukaan ini mengakibatkan perbedaan nilai koefisien drag dimana nilai koefisien drag pada *advancing blade* lebih besar dibanding pada *returning blade*. Akibatnya, gaya drag yang muncul pada *advancing blade* lebih besar daripada gaya drag yang muncul pada *returning blade*. Perbedaan gaya drag inilah yang menghasilkan resultan gaya dan menghasilkan torsi yang memutar poros turbin angin Savonius.

Turbin angin Savonius bekerja pada *tip speed ratio* rendah. Hal ini didukung oleh desain turbin yang memiliki *solidity* yang tinggi, yaitu rasio area sudu aktual terhadap area turbin yang tertiuip angin. Akibatnya, turbin angin Savonius memiliki torsi awal yang besar dan kemampuan *self starting* yang relatif baik. Efisiensi yang

dihasilkan turbin ini relatif rendah, yaitu berkisar antara 25%-35%. Namun dengan efisiensi yang rendah, turbin angin Savonius memiliki desain yang mudah dibuat dan ekonomis.

## 2.2 Gaya Hambat

Sebuah *solid body* yang melalui suatu aliran *viscous* akan menerima gaya total  $\vec{F}$ . Gaya ini berasal dari tegangan permukaan yang muncul akibat adanya aliran fluida. Untuk mendefinisikan gaya total  $\vec{F}$ , komponen gaya perlu diuraikan menjadi dua gaya, yaitu gaya angkat (*lift force*) dan gaya hambat (*drag force*). Gaya angkat didefinisikan sebagai komponen gaya pada sebuah *body* yang tegak lurus terhadap arah gerak relatifnya. Sedangkan, gaya hambat didefinisikan sebagai komponen gaya pada sebuah *body* yang paralel terhadap arah gerak relatifnya. Gaya hambat terdiri dari gaya akibat tegangan geser antara fluida dengan permukaan atau fluida dengan fluida lainnya (*friction drag*), dan gaya akibat tekanan yang sejajar terhadap arah aliran datang (*pressure drag*). Gaya hambat total merupakan penjumlahan dari gaya hambat akibat *friction drag* dan *pressure drag*.



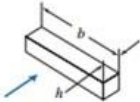






**Gambar 2.2** Penguraian komponen gaya hambat dan gaya angkat

Dari Gambar 2.2 maka dapat dirumuskan besarnya gaya hambat adalah sebagai berikut:

$$F_D = F_{Dp} + F_{Df}$$

$$F_D = \int p dA \cos \theta + \int \tau dA \sin \theta \quad (2.1)$$

**Tabel 2.1** Nilai *coefficient of drag* pada beberapa bentuk benda (Pritchard, 2011)

Object	Diagram	$C_D (Re \geq 10^3)$
Square Prism		$b/h = \infty$ 2.05 $b/h = 1$ 1.05
Disk		1.17
Ring		1.20
Hemisphere (open end facing flow)		1.42
Hemisphere (open end facing downstream)		0.38
C-section (open side facing flow)		2.30
C-section (open side facing downstream)		1.20

Karena persamaan di atas sulit digunakan pada bentuk *body* yang rumit maka perhitungan gaya hambat disederhanakan menjadi persamaan berikut:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho U^2 A \quad (2.2)$$



dimana  $C_D$  merupakan *coefficient of drag*, yaitu bilangan tak berdimensi yang nilainya didapatkan dari hasil eksperimen. Nilai *coefficient of drag* pada beberapa bentuk *body* dapat dilihat pada Tabel 2.1. Turbin angin Savonius tersusun atas 2 potongan silinder yang membentuk *C-section* yang terbuka menghadap aliran pada *advancing blade* dan dalam arah berlawanan pada *returning blade*. Nilai *coefficient of drag* pada *advancing blade* dan *returning blade* masing-masing sebesar 2,30 dan 1,20.

### 2.3 Daya Pada Turbin

Daya didefinisikan sebagai laju suatu usaha yang dilakukan. Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, energi yang dimiliki angin merupakan energi kinetis dari massa udara yang bergerak. Daya yang dihasilkan angin merupakan besarnya energi kinetis yang dibawa terhadap waktu. Besarnya energi kinetis yang dimiliki angin yaitu:

$$E_k = \frac{1}{2} mU^2 \quad (2.3)$$

Sehingga daya yang dihasilkan oleh angin ialah:

$$P_w = \frac{E_k}{t} \quad (2.4)$$

$$P_w = \frac{\frac{1}{2} mU^2}{t}$$

dimana,

$$\begin{aligned} \dot{m} &= \frac{m}{t} \\ \dot{m} &= \rho UA \end{aligned} \quad (2.5)$$

maka,

$$P_w = \frac{1}{2} \dot{m}U^2 \quad (2.6)$$

$$P_w = \frac{1}{2}(\rho UA)U^2$$

$$P_w = \frac{1}{2}\rho AU^3$$

dimana:  $P_w$  = daya kinetis angin (*Watt*)

$E_k$  = energi kinetis (*Joule*)

$t$  = waktu (*s*)

$\dot{m}$  = *mass flow rate* (*kg/s*)

$\rho$  = massa jenis udara (*kg/m<sup>3</sup>*)

$U$  = kecepatan aliran udara (*m/s*)

$A$  = luas penampang turbin (*m<sup>2</sup>*)

Turbin angin juga menghasilkan daya mekanis dari gerak berputar turbin. Daya mekanis dari turbin angin dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$W = Fds \tag{2.7}$$

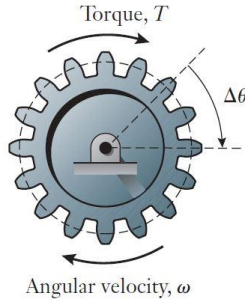
$$P_t = \frac{dW}{dt}$$

$$P_t = \frac{Fds}{dt}$$

$$P_t = Fv$$

$$P_t = FR\omega$$

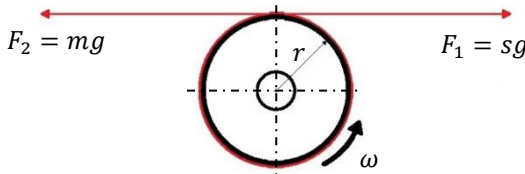
dimana,  $T = F \times R$ , maka:



**Gambar 2.3** Gerak berputar pada sebuah roda gigi (Wickert, 2013)

$$P_t = T\omega$$

$$P_t = T \frac{2\pi n}{60}$$



**Gambar 2.4** Penguraian komponen gaya pada piringan *brake dynamometer*

Pada sebuah *brake dynamometer*, torsi dinamis dihitung berdasarkan seiliah gaya yang dihasilkan oleh tarikan 2 benang yang terhubung dengan dua buah massa penghasil gaya. Gambar 2.4 menunjukkan *free body diagram* dari gaya-gaya yang bekerja pada *brake dynamometer*. Sehingga, persamaan daya mekanis turbin dapat dihitung dengan persamaan berikut:

$$P_t = (s - m)gr \frac{2\pi n}{60} \quad (2.8)$$

dimana:  $P_t$  = daya mekanis turbin (*Watt*)

$W$  = usaha (*Joule*)  
 $F$  = gaya (*Newton*)  
 $ds$  = perpindahan (*m*)  
 $v$  = kecepatan tangensial (*m/s*)  
 $\omega$  = kecepatan sudut (*rad/s*)  
 $r$  = jari-jari (*m*)  
 $T$  = torsi (*Nm*)  
 $n$  = kecepatan putar (*rpm*)  
 $s$  = skala massa pada neraca pegas (*kg*)  
 $m$  = massa beban pemberat (*kg*)

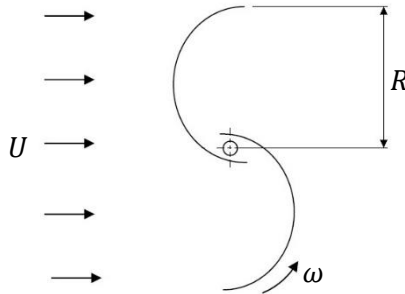
*Coefficient of Power* (CoP) merupakan rasio daya yang dihasilkan oleh turbin terhadap daya angin yang digunakan. CoP menunjukkan derajat pemanfaatan daya yang digunakan oleh angin untuk diubah menjadi daya turbin. CoP juga dikaitkan dengan efisiensi turbin, semakin tinggi nilai CoP maka efisiensinya semakin baik. Nilai CoP didapatkan dari persamaan berikut:

$$CoP = \frac{P_t}{P_w} \quad (2.9)$$

$$CoP = \frac{(s - m)gR \frac{2\pi n}{(60 \text{ s})}}{\frac{1}{2}\rho AU^3}$$

## 2.4 Tip Speed Ratio

Rasio antara kecepatan tangensial bagian ujung sudu turbin terhadap kecepatan angin disebut *tip speed ratio* (TSR) yang dilambangkan dengan huruf lamda ( $\lambda$ ). *Tip speed ratio* dapat diilustrasikan pada Gambar 2.5.



**Gambar 2.5** *Tip speed ratio* pada turbin angin Savonius

$$TSR = \frac{\text{kecepatan ujung sudu}}{\text{kecepatan angin}}$$

$$TSR = \frac{\omega R}{U} \quad (2.12)$$

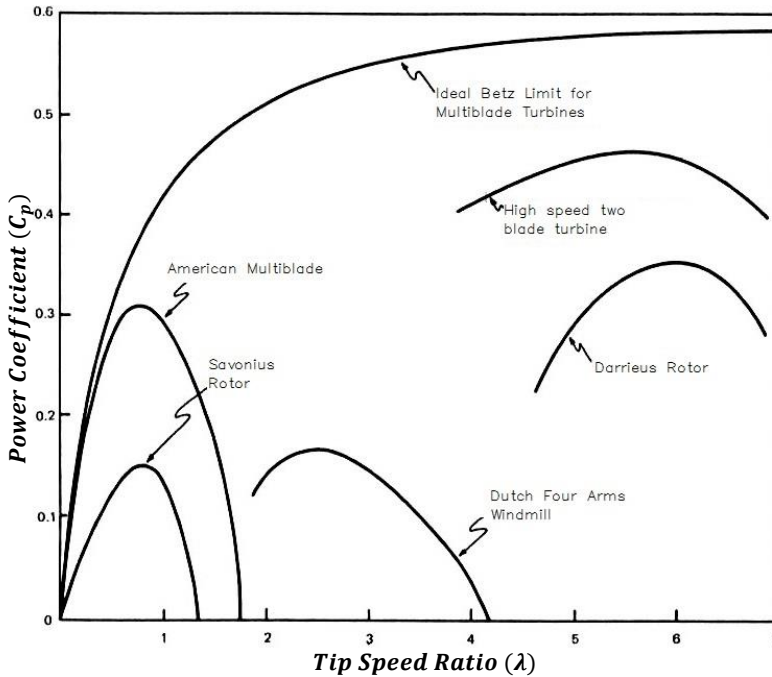
dimana:  $TSR$  = *tip speed ratio*

$\omega$  = kecepatan sudut turbin ( $rad/s$ )

$R$  = jari-jari turbin ( $m$ )

$U$  = kecepatan aliran udara ( $m/s$ )

*Tip speed ratio* digunakan untuk menganalisis performa turbin. Dalam diagram  $C_p - \lambda$  dimana  $C_p$  adalah *power coefficient*, dapat terlihat bahwa tiap jenis turbin angin memiliki karakteristik yang berbeda. *Power coefficient* menunjukkan perbandingan pemanfaatan daya angin yang digunakan untuk diubah menjadi daya listrik generator. Diagram  $C_p - \lambda$  dapat dilihat pada Gambar 2.5. Tiap jenis turbin angin akan mencapai *power coefficient* optimumnya pada kondisi  $TSR$  tertentu. Oleh karena itu, sangat penting untuk mempertimbangkan kecepatan angin yang akan digunakan dalam mendesain suatu turbin angin.



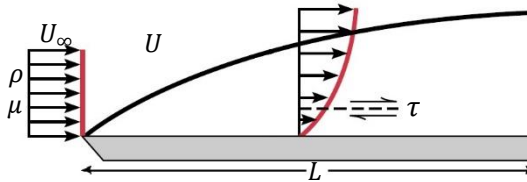
**Gambar 2.6** Diagram *power coefficient* terhadap *tip speed ratio* (Ragheb, 2011)

Seorang fisikawan berkebangsaan Jerman, Albert Betz, menemukan batas maksimum *power coefficient* untuk sebuah turbin angin ideal menggunakan teori momentum aksial. Betz menemukan bahwa turbin angin yang gaya penggerak utamanya adalah gaya angkat memiliki *power coefficient* maksimum sebesar 59,3%. Nilai ini dikenal sebagai batas Betz (*Betz limit*). Gambar 2.6 menunjukkan *power coefficient* dari beragam jenis turbin angin pada beragam nilai *tip speed ratio*. Turbin angin Savonius memiliki rentang kerja pada *tip speed ratio* yang rendah, yaitu kurang 1,4 dengan *power coefficient* maksimum sekitar 15%. Namun, beberapa *drag turbines* seperti turbin angin Savonius mampu

mencapai nilai *power coefficient* yang lebih tinggi dengan desain dan pengondisian yang tepat.

## 2.5 Bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds ( $Re$ ) merupakan bilangan tidak berdimensi yang menentukan karakteristik sebuah *flow regime*. Secara garis besar *flow regime* terdiri dari aliran laminar, dan aliran turbulen, serta aliran transisi. Bilangan Reynolds ditemukan oleh seorang profesor asal Inggris, Osborne Reynolds. Bilangan ini menunjukkan rasio antara gaya inersia terhadap gaya *viscous*. Secara umum Bilangan Reynolds dapat dirumuskan sebagai berikut:



**Gambar 2.7** Boundary layer sebuah aliran di atas plat datar

$$Re = \frac{\text{Gaya Inersia}}{\text{Gaya Viscous}} \quad (2.13)$$

$$\text{Gaya Inersia} = p \times A = (\rho U^2)A \quad (2.14)$$

$$\text{Gaya Viscous} = \tau \times A = \left(\frac{\mu U}{L}\right)A \quad (2.15)$$

dimana:  $Re$  = bilangan Reynolds

$p$  = tekanan ( $N/m^2$ )

$\tau$  = tegangan geser ( $N/m^2$ )

$\rho$  = massa jenis udara ( $kg/m^3$ )

$U$  = kecepatan aliran fluida ( $m/s$ )

$L$  = panjang karakteristik aliran ( $m$ )

$\mu$  = viskositas dinamis fluida ( $Ns$ )

sehingga,

$$Re = \frac{(\rho U^2)A}{\left(\frac{\mu U}{L}\right)A}$$

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (2.16)$$

Bilangan Reynolds menjadi salah satu variabel yang sangat penting dalam analisis aliran suatu fluida. Dari persamaan (2.16) dapat terlihat bahwa Bilangan Reynolds dipengaruhi oleh viskositas dinamis dan massa jenis fluida sehingga jenis aliran suatu fluida sangat dipengaruhi oleh temperatur, tekanan fluida dan jenis fluidanya.

Perhitungan nilai massa jenis fluida berupa gas dapat menggunakan persamaan Boyle-Gay Lussac, yaitu:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (2.17)$$

Karena  $V = \frac{m}{\rho}$  dan kondisi 1 dan 2 merupakan kondisi pada tekanan yang sama dengan massa fluida yang sama pula, maka  $P_1 = P_2$  dan  $m_1 = m_2$  dimana kondisi 1 merupakan kondisi 1 merupakan kondisi acuan sedangkan kondisi 2 merupakan kondisi pengujian. Maka,

$$\frac{P_1 m_1}{T_1 \rho_1} = \frac{P_2 m_2}{T_2 \rho_2}$$

$$\rho_2 = \frac{T_1 \rho_1}{T_2} \quad (2.18)$$

dimana:  $P_1$  = tekanan absolut udara pada kondisi 1 ( $N/m^2$ )  
 $P_2$  = tekanan absolut udara pada kondisi 2 ( $N/m^2$ )  
 $V_1$  = volume udara pada kondisi 1 ( $m^3$ )



$$\begin{aligned}
V_2 &= \text{volume udara pada kondisi 2 } (m^3) \\
T_1 &= \text{temperatur absolut udara pada kondisi 1 } (K) \\
T_2 &= \text{temperatur absolut udara pada kondisi 2 } (K) \\
m_1 &= \text{massa udara pada kondisi 1 } (kg) \\
m_2 &= \text{massa udara pada kondisi 2 } (kg) \\
\rho_1 &= \text{massa jenis udara pada kondisi 1 } (kg/m^3) \\
\rho_2 &= \text{massa jenis udara pada kondisi 2 } (kg/m^3)
\end{aligned}$$

Untuk perhitungan nilai viskositas dinamis dari udara, digunakan persamaan Sutherland mengenai pengaruh temperatur terhadap viskositas fluida gas berikut:

$$\mu = \frac{C T^{1.5}}{S + T} \quad (2.19)$$

dimana:  $\mu$  = viskositas dinamis gas ( $Ns$ )  
 $C$  = konstanta empiris ( $Ns/m^2 K^{1/2}$ )  
 $T$  = Temperatur absolut pengujian ( $K$ )  
 $S$  = konstanta Sutherland ( $K$ )

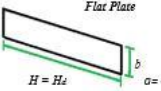

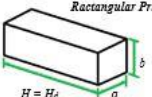
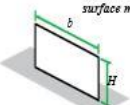
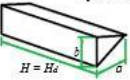

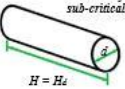
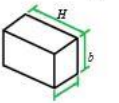
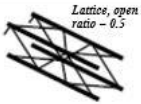
Sehingga, nilai kecepatan udara yang dibutuhkan untuk bilangan Reynolds dan kondisi fluida yang diketahui dapat dihitung dengan persamaan:

$$U = \frac{\mu Re}{\rho L} \quad (2.20)$$

## 2.6 Blockage Effect

Dalam sebuah percobaan *wind tunnel*, skala geometri dari model terbatas pada *blockage effect* yang dapat muncul. Di dalam *wind tunnel*, area uji akan terbatas oleh *boundary layer* yang terbentuk oleh dinding *wind tunnel*. *Blockage effect* itu sendiri ialah pengaruh terhadap aliran akibat *blockage ratio* yang melebihi batas standar. *Blockage ratio* adalah perbandingan frontal area terhadap

penampang melintang aliran fluida. *Blockage effect* menyebabkan tegangan permukaan yang lebih besar dibanding pada udara bebas.

Body Shape	$\epsilon$ ; $m$ ; maximum $S/A$	Body Shape	$\epsilon$ ; $m$ ; maximum $S/A$
 <p>Flat Plate <math>H = H_0</math> <math>a = 0</math></p>	$\epsilon = 0.86$ $m = 1.85$ for $S/A \leq 0.25$	 <p>Flat Plate, center mounted</p>	$\epsilon = 2.84 - 0.07H/b$ $m = 3.20 - 0.05H/b$ for $H/b \leq 20$ for $S/A \leq 0.10$
 <p>Rectangular Prism <math>H = H_0</math></p>	for $0.2 < a/b < 0.6$ $\epsilon = 1.11 + 0.94a/b$ for $0.75 < a/b < 3$ $\epsilon = 1.11 - 0.14a/b$ for $S/A \leq 0.20$	 <p>Flat Plate, surface mounted</p>	$\epsilon = 2.84 - 0.07H/b$ $m = 3.20 - 0.05H/b$ for $H/b \leq 20$ for $S/A \leq 0.10$
 <p>Equilateral Prism <math>H = H_0</math></p>	$\epsilon = 0.88$ $m = 2.06$ for $S/A \leq 0.20$	 <p>Near-circular, triangular flat plates, <math>H/b = 1</math></p>	Use value for rectangular plate of same $H/b$ for $S/A \leq 0.15$
 <p>Circular cylinder, sub-critical flow <math>H = H_0</math></p>	$m = 1.38$ for $S/A \leq 0.20$	 <p>Rectangular block</p>	Use value for flat plate of same $H/b$ provided flow reattachment $a/b \leq 2.50$ for $S/A \leq 0.15$
 <p>Lattice, open area ratio = 0.5</p>	$m = 1.30$ for $S/A \leq 0.10$		

**Gambar 2.8** Nilai *blockage correction factor* untuk beberapa jenis **body** (Ian, 2010)

Analisis mengenai *blockage effect* dapat digunakan menggunakan *blockage correction factor*. Metode penyelesaian *blockage correction factor* ditemukan oleh Pope. Kemudian muncul metode-metode lain yang lebih akurat diantaranya metode yang ditemukan oleh Maskell, dan metode *wall pressure*. Beberapa nilai *blockage correction factor* dapat dilihat pada Gambar 2.8.

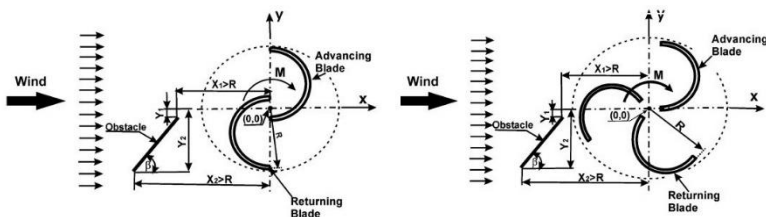
## 2.7 Penelitian Terdahulu

Studi mengenai turbin angin Savonius telah banyak dilakukan oleh para peneliti di dunia. Berikut adalah beberapa

penelitian mengenai turbin angin Savonius yang berkaitan dengan optimalisasi performa turbin angin Savonius.

### 2.7.1 Analisis Numerik Optimalisasi Turbin Angin Savonius Menggunakan Plat Penghalang

Penelitian mengenai turbin angin Savonius pernah dilakukan oleh **Mohamed et al. (2010)** dengan membandingkan performa turbin angin dengan dan tanpa pemberian plat penghalang di depan sisi *returning blade*. Analisis dilakukan dengan simulasi *software* CFD pada turbin angin Savonius 2 sudu dan 3 sudu. Skema yang digunakan dalam penelitian ini ditunjukkan oleh Gambar 2.9. Posisi penghalang didapatkan pada kondisi optimum yang telah didapatkan pada penelitian sebelumnya.



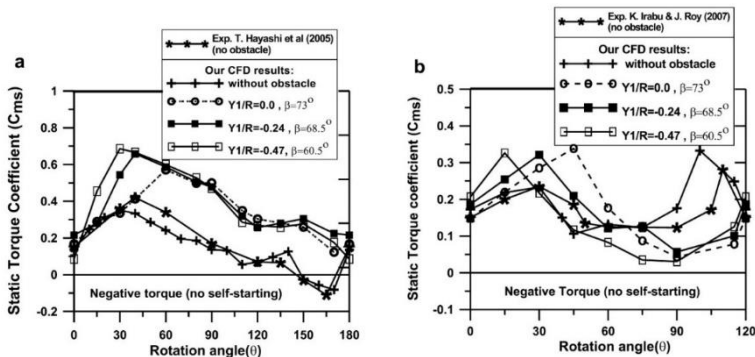
**Gambar 2.9** Skema penelitian plat penghalang pada turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu (**Mohamed et al, 2010**)

**Tabel 2.2** Posisi optimal plat penghalang (**Mohamed et al, 2010**)

Jenis Sudu	Parameter	Nilai	$\beta$	$C_p$
Savonius dua sudu	$X_1/R$	-1.23830	100.83°	0.2503
	$Y_1/R$	-0.45390		
	$X_2/R$	-1.09993		
Savonius tiga sudu	$X_1/R$	-1.05632	80.52°	0.2120
	$Y_1/R$	-0.36912		
	$X_2/R$	-1.38162		

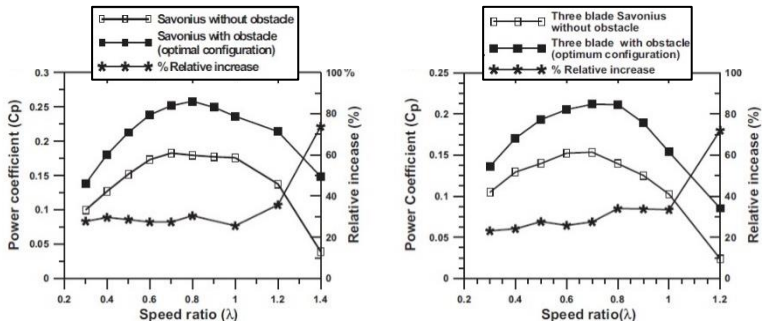
Sehingga didapatkan posisi optimum untuk plat penghalang seperti pada Tabel 2.2. Posisi optimum untuk turbin angin

Savonius dua sudu diperoleh pada sudut  $\beta=100,83^\circ$  dan pada turbin angin Savonius pada sudut  $\beta=80,52^\circ$ .



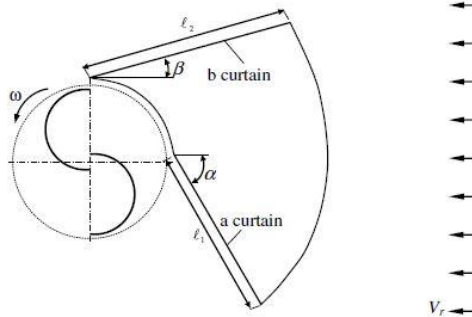
**Gambar 2.10** Koefisien torsi statis pada turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

Kemudian dengan posisi plat penghalang yang tetap dilakukan variasi terhadap *tip speed ratio*. Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa penambahan plat penghalang meningkatkan performa turbin angin Savonius yang ditandai dengan peningkatan *power coefficient* dan *static torque coefficient* pada kedua jenis turbin. Pada Gambar 2.10 terlihat bahwa turbin angin Savonius tiga sudu memiliki *self starting capability* yang lebih baik dibandingkan dengan turbin angin Savonius dua sudu. Hal ini ditandai dengan tidak adanya nilai *static torque coefficient* kurang dari 1 di hampir semua sudut bukaan turbin. Sedangkan, pada turbin angin Savonius dua sudu, masih terdapat nilai *static torque coefficient* yang kurang dari 1 pada beberapa sudut bukaan turbin. Hal sebaliknya terjadi pada nilai *power coefficient* dimana nilai tertinggi diperoleh pada turbin angin Savonius dua sudu. Hal ini terlihat pada Gambar 2.11.



**Gambar 2.11** Koefisien daya pada turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu (Mohamed et al, 2010)

## 2.7.2 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius Dengan Plat Penghalang Pada Aliran Eksternal



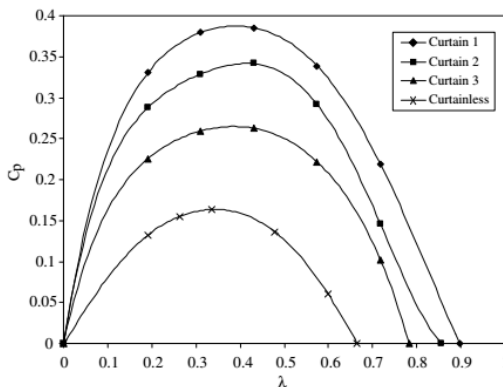
**Gambar 2.12** Skema penelitian turbin angin Savonius dengan plat pengarah dan plat penghalang (Altan et al, 2008)

Studi eksperimen mengenai turbin angin Savonius dan penambahan plat penghalang pernah dilakukan oleh **Altan et al. (2008)** dengan meletakkan 2 buah plat datar (*deflecting plate*) yang berfungsi untuk mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade*.

Percobaan dilakukan menggunakan turbin angin Savonius konvensional dua sudu dengan diameter turbin ( $D$ ) dan tinggi turbin ( $H$ ) 32 cm serta jarak *overlap* 2.6 cm dan ketebalan 2 mm. Turbin angin juga dilengkapi dengan dua buah *end-plate*. Plat penghalang diletakkan pada dua posisi dengan konfigurasi seperti pada Gambar 2.10. Pada percobaan ini besar sudut plat penghalang diatur pada nilai  $\alpha = 45^\circ$  dan  $\beta = 15^\circ$  untuk plat penghalang 1 dan 2 secara berurutan. Dimensi plat penghalang dan plat pengarah divariasikan ke dalam tiga jenis variasi. Adapun dimensi plat yang digunakan ditunjukkan pada Tabel 2.3. Konfigurasi 1 menunjukkan konfigurasi plat pengarah dan plat penghalang yang paling panjang, kemudian diikuti oleh konfigurasi 2 dan konfigurasi 3.

**Tabel 2.3** Konfigurasi dimensi plat penghalang (Altan et al, 2008)

Jenis konfigurasi	Jarak $\ell_1$ (cm)	Jarak $\ell_2$ (cm)
Konfigurasi 1	45	52
Konfigurasi 2	34	39
Konfigurasi 3	22	26

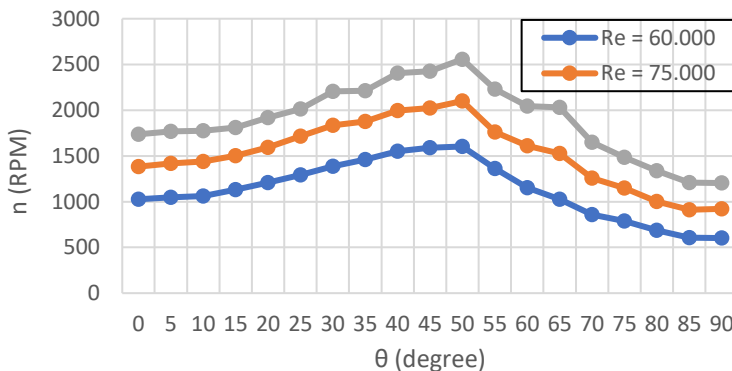


**Gambar 2.13** *Power coefficient* yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan dan tanpa plat penghalang (Altan et al, 2008)

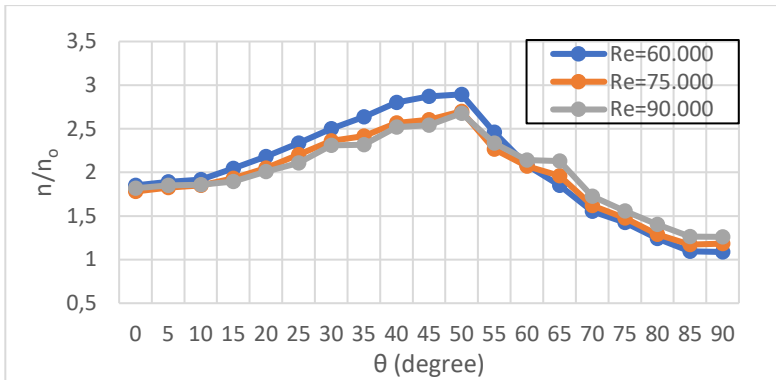
Dari penelitian ini didapatkan hasil bahwa *power coefficient* yang dihasilkan turbin angin Savonius dengan konfigurasi plat selalu lebih besar dibandingkan dengan tanpa plat penghalang. Hal ini ditunjukkan pada Gambar 2.13. Konfigurasi plat penghalang dengan dimensi terpanjang menunjukkan performa terbaik. Hal ini dikarenakan luasan plat penghalang yang lebih besar sehingga mampu membelokkan udara lebih banyak.

### 2.7.3 Studi Eksperimen Peningkatan Performa Turbin Angin Savonius Dengan Plat Penghalang Pada *Subsonic Wind Tunnel*

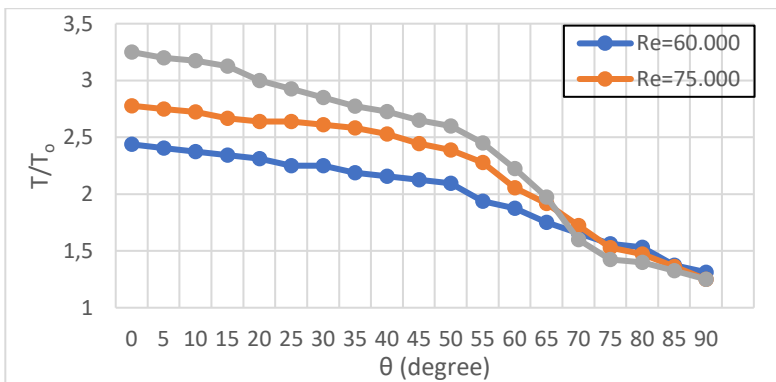
Penelitian serupa juga pernah dilakukan oleh **Setyanto (2016)** dengan melakukan eksperimen di dalam *subsonic wind tunnel*. Plat penghalang diletakkan di depan *returning blade* dengan perbandingan lebar plat penghalang ( $L$ ) terhadap diameter sudu turbin ( $D$ ) sebesar  $\frac{L}{D} = 2$ . Kemudian dilakukan variasi besar sudut plat penghalang terhadap turbin angin Savonius. Sebuah generator yang tersambung dengan rangkaian hambatan berupa lampu digunakan untuk mengukur besarnya daya yang dihasilkan turbin angin Savonius.



**Gambar 2.14** Grafik putaran terhadap sudut plat penghalang turbin angin Savonius (**Setyanto, 2016**)



**Gambar 2.15** Grafik perbandingan putaran turbin ( $n/n_0$ ) terhadap sudut plat datar pengganggu di turbin angin Savonius (Setyanto, 2016)

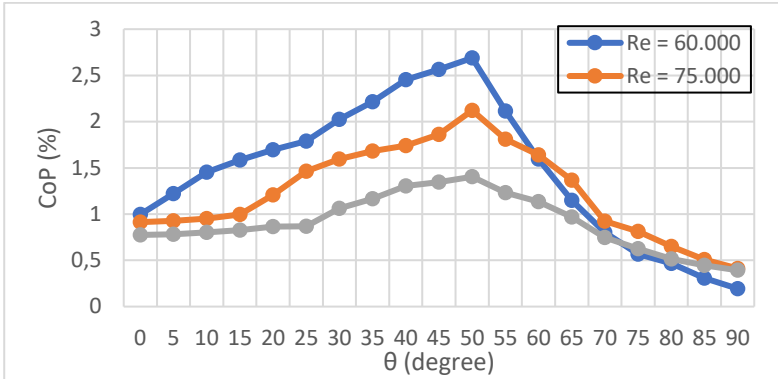


**Gambar 2.16** Grafik perbandingan torsi statis ( $T/T_0$ ) terhadap sudut plat data pengganggu di turbin angin Savonius (Setyanto, 2016)

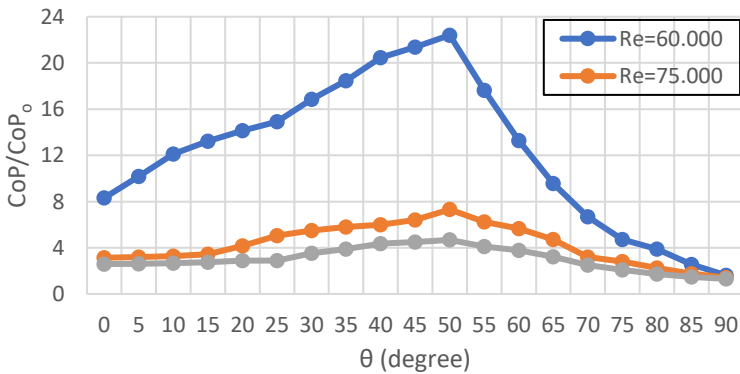
Dari penelitian yang dilakukan didapatkan bahwa putaran turbin angin Savonius mengalami peningkatan ketika diberikan plat penghalang. Putaran turbin angin terbesar terjadi pada sudut  $\theta = 50^\circ$  pada nilai  $Re = 9,0 \times 10^4$ . Grafik pengaruh sudut plat penghalang terhadap putaran turbin dapat dilihat pada Gambar 2.14. Kenaikan putaran turbin angin Savonius dengan dan tanpa



penghalang dapat ditunjukkan oleh rasio keduanya. Hal ini ditunjukkan oleh grafik pada Gambar 2.15. Hal serupa dilakukan untuk menganalisis torsi statis yang dihasilkan turbin angin Savonius sehingga didapatkan grafik seperti pada Gambar 2.16.



(a)



(b)

**Gambar 2.17** (a) Grafik nilai *coefficient of power* dan (b) kenaikan *coefficient of power* dibandingkan dengan kondisi tanpa pla penghalang (Setyanto, 2016)

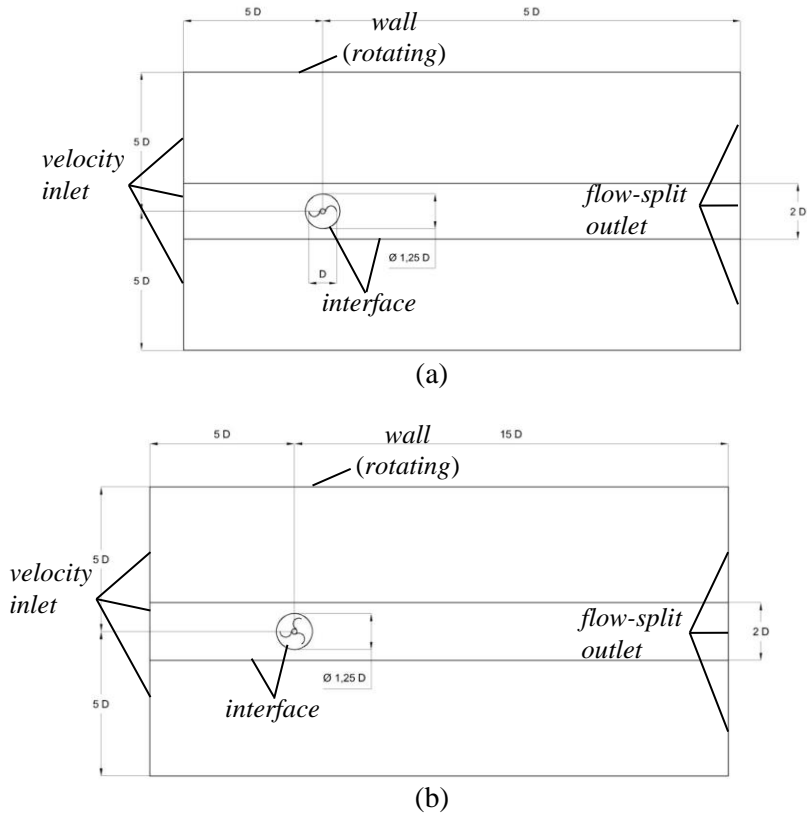
Namun penelitian ini dianggap memiliki kelemahan pada perbandingan luas benda uji dengan luas area uji. Rasio keduanya menunjukkan nilai sekitar 24%, lebih besar dari batas yang dianjurkan untuk melakukan penelitian, yaitu 10%. Hal ini dapat menimbulkan adanya *blockage effect* sehingga bisa menyebabkan data yang diambil tidak sesuai dengan fenomena aliran yang sebenarnya.

*Coefficient of power* mencapai nilai tertinggi saat sudut  $\theta = 50^\circ$  pada nilai  $Re = 6,0 \times 10^4$  yaitu sekitar 2,6% atau meningkat hampir 23 kali lipat dibandingkan dengan kondisi tanpa plat penghalang. Grafik perbandingan CoP dan CoP/CoP<sub>0</sub> terhadap sudut plat penghalang ditunjukkan oleh Gambar 2.17.

#### 2.7.4 Studi Numerik Turbin Angin Savonius 2 Sudu dan 3 Sudu dengan Variasi Kecepatan Aliran Udara

Analisis numerik untuk turbin angin Savonius pernah dilakukan oleh **Sunandi (2016)** menggunakan *software* STAR-CCM+ 9.02.007-R8 dengan memvariasikan jumlah sudu dan kecepatan aliran udara. Turbin angin yang digunakan memiliki diameter rotor  $D = 75$  mm dan diameter poros 15 mm.

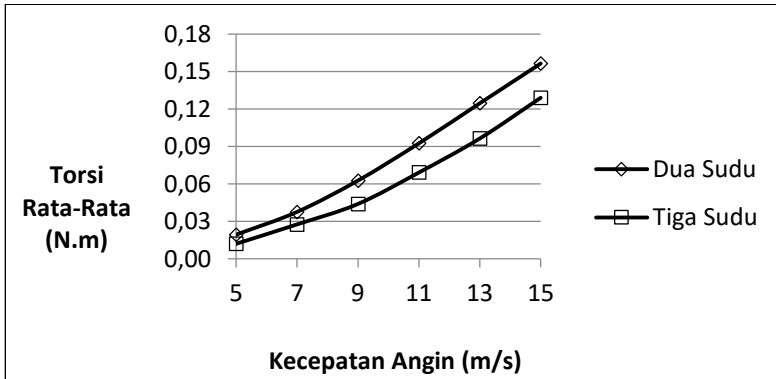
*Domain* simulasi yang digunakan terdiri dari *static domain* dan *rotating domain*. *Static domain* adalah *domain* terluar yang dilintasi oleh fluida dan *domain* ini tidak bergerak. *Domain* ini ditunjukkan dengan bentuk persegi yang mengelilingi *rotating domain* pada Gambar 2.18. Sedangkan *rotating domain* ditunjukkan dengan bentuk lingkaran yang mengelilingi sudu-sudu dan poros turbin angin Savonius. *Boundary condition* pada penelitian ini dibuat untuk menentukan batasan-batasan yang terjadi pada aliran yang melewati benda uji dengan menetapkan *inlet*, *outlet*, *wall*, dan *interface*. Model aliran pada penelitian ini menggunakan gas sebagai fluidanya dengan model *segregated flow* dan *turbulence modelling* k-epsilon *realizable*. Kemudian, parameter *implicit unsteady* dipilih dengan skema diskretisasi *second order upwind*. Diskretisasi *time step* yang digunakan adalah *second order*.



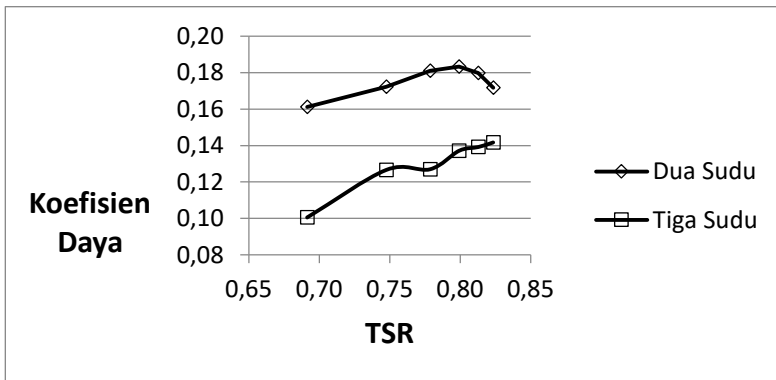
**Gambar 2.18** Geometri turbin angin Savonius (a) dua sudu dan (b) tiga sudu (Sunandi, 2016)

Dari penelitian ini diperoleh hasil bahwa besarnya torsi yang dihasilkan dipengaruhi oleh jumlah sudu turbin angin Savonius. Pada Gambar 2.19 terlihat bahwa torsi pada turbin angin Savonius dua sudu lebih besar dibandingkan pada turbin angin Savonius tiga sudu. Torsi terbesar untuk turbin angin Savonius dua sudu dan tiga sudu terjadi pada kecepatan angin 15 m/s dengan nilai torsi

maksimal adalah 0,156 Nm pada turbin dengan dua sudu dan 0,129 Nm pada turbin dengan tiga sudu.



**Gambar 2.19** Grafik torsi terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius (Sunandi, 2016)



**Gambar 2.20** Grafik koefisien daya terhadap kecepatan angin turbin angin Savonius (Sunandi, 2016)

Koefisien daya pada kedua turbin juga dianalisis dan ditampilkan pada Gambar 2.20. Diperoleh hasil koefisien daya terbesar yang dapat dicapai turbin angin Savonius dua sudu adalah 0,183 pada TSR 0,80 yang kemudian mengalami penurunan nilai

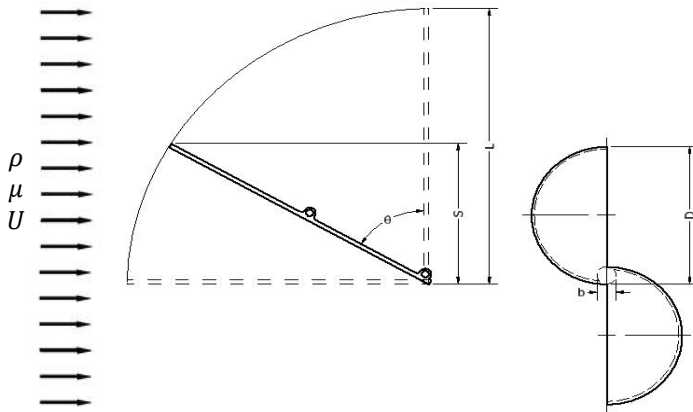
seiring kenaikan TSR hingga nilai TSR 0,82. Sedangkan pada turbin angin Savonius tiga sudu koefisien daya terbesar dicapai pada TSR 0,82 sebesar 0,142. Selain itu, diperoleh juga hasil bahwa koefisien daya turbin angin Savonius dua sudu selalu lebih besar dibandingkan dengan turbin angin Savonius tiga sudu pada TSR yang sama.

*“ halaman ini sengaja dikosongkan ”*

## BAB III METODOLOGI PENELITIAN

### 3.1 Skema Penelitian

Dalam penelitian ini, plat penghalang diletakkan di depan turbin angin Savonius dengan memvariasikan besar sudut plat penghalang terhadap kedudukan turbin. Benda uji diletakkan pada aliran eksternal dengan angin yang berasal dari *fan*. Skema benda uji dapat dilihat pada Gambar 3.1.

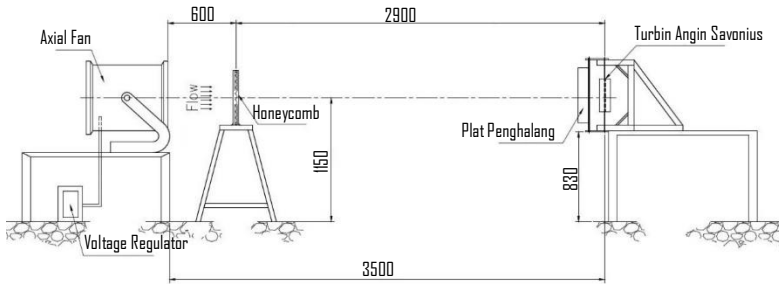


**Gambar 3.1** Skema benda uji

Dengan menggunakan skema pada Gambar 3.1 maka terdapat beberapa parameter yang perlu diperhitungkan pengaruhnya terhadap variabel yang akan diteliti, yaitu performa turbin angin Savonius. Parameter tersebut meliputi massa jenis fluida ( $\rho$ ), viskositas fluida ( $\mu$ ), kecepatan fluida ( $U$ ), diameter turbin ( $D$ ), tinggi turbin ( $H$ ), *overlap diameter* ( $b$ ), lebar plat penghalang ( $L$ ), proyeksi dari lebar plat terhadap sudut terhadap turbin ( $S$ ), dan kecepatan putaran turbin ( $n$ ).

Pada penelitian ini benda uji akan dialiri udara dari *fan* yang ditempatkan sejauh 3,5 meter dari benda uji. Untuk menghasilkan aliran udara yang linier ditempatkan *honeycomb* diantara *fan* dan

benda uji. Kecepatan aliran udara dari *fan* diatur dengan mengubah tegangan listrik menggunakan *voltage regulator*. Skema penelitian ini dapat dilihat pada Gambar 3.2.



**Gambar 3.2** Skema penelitian

### 3.2 Analisis Dimensi

Dalam menganalisis dimensi pada nilai *coefficient of power* digunakan metode *Buckingham-Phi Theorm*. Adapun langkah yang digunakan yaitu sebagai berikut:

1. Menentukan parameter-parameter yang berpengaruh

$$P = f(\rho, \mu, U, D, H, b, L, S, n)$$

Parameter (n) yang ada berjumlah 10, yaitu sebagai berikut:

$P$  = Power, J/s

$\rho$  = massa jenis udara,  $\text{kg/m}^3$

$\mu$  = viskositas absolut udara,  $\text{N.s/m}^2$

$U$  = kecepatan aliran udara, m/s

$D$  = diameter sudu turbin, m

$H$  = tinggi turbin, m

$b$  = *overlap diameter*, m

$L$  = lebar plat penghalang, m

$S$  = proyeksi lebar plat pada turbin, m

$n$  = kecepatan putar sudu turbin angin Savonius, rpm

2. Menentukan set dimensi primer yang digunakan

Set dimensi primer yang digunakan ialah  $[M, L, t, T]$



### 3. Membuat dimensi primer dari parameter yang dipilih

**Tabel 3.1** Dimensi primer parameter

Parameter	P	$\rho$	$\mu$	U	D	L	S	H	b	n
Dimensi	$\frac{M L^2}{t^3}$	$\frac{M}{L^3}$	$\frac{M}{L t}$	$\frac{L}{t}$	L	L	S	H	L	$\frac{1}{t}$

#### 4. Memilih parameter berulang

Jumlah parameter berulang (m) sama dengan jumlah dimensi primer (r). Adapun parameter berulang tersebut yaitu:  $\rho$ , U, D. Jumlah parameter berulang yaitu  $m=r=3$

#### 5. Menentukan grup tak berdimensi yang akan dihasilkan

Jumlah grup tak berdimensi yang akan dihasilkan  $= n-m = 10 - 3 = 7$ .

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \rho^a U^b D^c P = \left(\frac{M}{L^3}\right)^a \left(\frac{L}{t}\right)^b (L)^c \left(\frac{M L^2}{t^3}\right) \\ &= (M^0 L^0 t^0)\end{aligned}$$

dimana :

$$M : a + 1 = 0$$

$$L : -3a + b + c + 2 = 0$$

$$t : -b - 3 = 0$$

maka diperoleh :

$$a = -1 ; b = -3 ; c = -2$$

sehingga :

$$\pi_1 = \rho^{-1} U^{-3} D^{-2} P$$

atau

$$\pi_1 = \frac{P}{\rho U^3 D^2}$$

$$\begin{aligned}\pi_2 &= \frac{\mu}{\rho U D} \\ \pi_3 &= \frac{L}{D} \\ \pi_4 &= \frac{S}{D} \\ \pi_5 &= \frac{H}{D} \\ \pi_6 &= \frac{b}{D} \\ \pi_7 &= \frac{D n}{U}\end{aligned}$$

6. Memeriksa grup tanpa dimensi yang dihasilkan dengan menggunakan dimensi primer yang lain.

$$\begin{aligned}\pi_1 &= \frac{P}{\rho U^3 D^2} = \frac{F L}{t} \frac{L^4}{F t^2} \frac{t^3}{L^3} \frac{1}{L^2} = 1 \\ \pi_2 &= \frac{\mu}{\rho U D} = \frac{F t}{L^2} \frac{L^4}{F t^2} \frac{t}{L} \frac{1}{L} = 1 \\ \pi_3 &= \frac{L}{D} = L \frac{1}{L} = 1 \\ \pi_4 &= \frac{S}{D} = L \frac{1}{L} = 1 \\ \pi_5 &= \frac{H}{D} = L \frac{1}{L} = 1 \\ \pi_6 &= \frac{b}{D} = L \frac{1}{L} = 1 \\ \pi_7 &= \frac{D n}{U} = L \frac{1}{t} \frac{t}{L} = 1\end{aligned}$$

Dari analisis dimensi yang telah dilakukan, didapatkan enam grup tak berdimensi. Adapun keenam grup tak berdimensi tersebut ialah sebagai berikut:

$$\pi_1 = \text{coefficient of Power}$$

- $\pi_2$  = bilangan Reynolds  
 $\pi_3$  = rasio lebar plat penghalang dengan diameter sudu turbin angin Savonius  
 $\pi_4$  = rasio lebar proyeksi plat terhadap diameter sudu turbin angin Savonius  
 $\pi_5$  = rasio tinggi terhadap diameter sudu turbin angin Savonius  
 $\pi_6$  = rasio diameter overlap terhadap diameter sudu turbin angin Savonius  
 $\pi_7$  = rasio kecepatan tangensial bagian ujung sudu turbin angin Savonius terhadap kecepatan angin (*tip speed ratio*)

dimana hubungan antara grup tak berdimensi ialah:

$$\pi_1 = f(\pi_2, \pi_3, \pi_4, \pi_5, \pi_6, \pi_7)$$

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_1\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{L}{D}, \frac{S}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}, \frac{D n}{U}\right)$$

Pada penelitian ini  $\frac{L}{D}, \frac{H}{D}, \frac{b}{D}$  sebagai variabel tetap, sedangkan  $\frac{\mu}{\rho U D}$  dan  $\frac{S}{D}$  divariasikan agar dapat mengetahui seberapa besar pengaruhnya terhadap *Coefficient of Power* pada turbin angin sehingga :

$$\frac{P}{\rho U^3 D^2} = f_2\left(\frac{\mu}{\rho U D}, \frac{S}{D}, \frac{D n}{U}\right)$$

dimana nilai  $S = L \cos \theta$  dengan nilai  $L$  yang tetap dan  $d = 2D - b$  dengan  $b$  tetap maka didapatkan :

$$CoP = f_3(Re, \theta, TSR)$$

### 3.3 Peralatan yang Digunakan

#### 3.3.1 Axial Fan dan Voltage Regulator

*Axial fan* digunakan untuk mengalirkan udara ke turbin angin Savonius. *Fan* yang digunakan pada penelitian ini yaitu CKE SPV-18 dengan spesifikasi seperti pada Tabel 3.2. *Fan* yang digunakan tidak memiliki pengaturan kecepatan aliran udara sehingga untuk mengatur kecepatan aliran udara diperlukan

*voltage regulator* untuk mengatur kecepatan putaran kipas pada *fan*.



**Gambar 3.3** Axial Fan CKE SPV-18

**Tabel 3.2** Spesifikasi Axial Fan CKE SPV-18

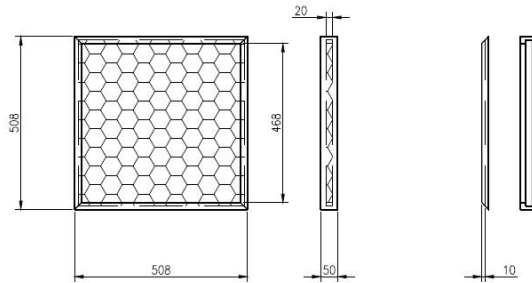
CKE SPV-18	
<b>Diameter</b>	18 inch / 450 mm
<b>Speed</b>	2850 RPM
<b>Air Flow</b>	4413 CFM
<b>Power</b>	1700 Watt
<b>Phase</b>	1
<b>Voltage</b>	220 – 240 V

### 3.3.2 Honeycomb

*Honeycomb* digunakan untuk menyearahkan aliran udara yang akan melewati turbin angin Savonius. *Honeycomb* berfungsi untuk mengembangkan atau menghasilkan aliran udara yang halus sehingga aliran udaranya lebih linier. *Honeycomb* yang digunakan berbentuk persegi dengan dimensi sebagai berikut:

- Panjang sisi *honeycomb* : 468 mm
- Panjang sisi *frame* : 508 mm
- Tebal *honeycomb* : 20 mm

- Tebal *frame* : 50 mm
- *Meshing size* : 16 lubang/in<sup>2</sup>



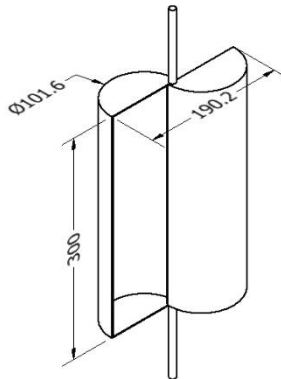
**Gambar 3.4** Skema *honeycomb*

### 3.3.3 Benda Uji

Benda uji dalam penelitian ini terdiri dari turbin angin Savonius dan plat penghalang. Dimensi dari kedua benda uji tersebut ialah sebagai berikut:

#### a. Dimensi Turbin Angin Savonius

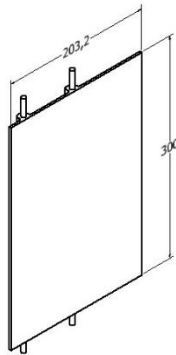
- Diameter sudu turbin ( $D$ ) : 101,6 mm
- Tinggi turbin ( $H$ ) : 300 mm
- *Overlap diameter* ( $b$ ) : 13 mm
- Diameter turbin ( $2D - b$ ) : 190,2 mm



**Gambar 3.5** Benda uji turbin angin Savonius

b. Dimensi Plat Penghalang

- Lebar plat penghalang ( $L$ ) : 203,2 mm
- Tinggi plat penghalang ( $H$ ) : 300 mm
- Tebal plat penghalang ( $t$ ) : 3 mm



**Gambar 3.6** Benda uji plat datar penghalang

### 3.3.4 Alat Ukur

Untuk mengukur variabel yang akan digunakan dalam perhitungan, digunakan beberapa alat ukur sebagai berikut:

a. Anemometer

Anemometer digunakan untuk mengukur kecepatan angin. Anemometer yang digunakan dalam penelitian ini adalah anemometer digital seri **OMEGA HHF-141A**. Pengukuran kecepatan angin dapat dilakukan menggunakan dua satuan pengukuran, yaitu m/s dan ft/min. Spesifikasi dari anemometer digital OMEGA HHF-141A dapat dilihat pada Tabel 3.3.



**Gambar 3.7** Anemometer Digital Omega HHF-141A

**Tabel 3.3** Spesifikasi Anemometer Digital Omega HHF-141A

<b>Omega HHF-141A</b>	
<b>Probe Diameter</b>	1 inch
<b>Measurement Range</b>	60 – 6800 ft/min 1,5– 35,00 m/s
<b>Resolution</b>	1 ft/min 0.01 m/s
<b>Accuracy</b>	$\pm(0,5\% \text{ FS} + 0,75\% \text{ reading} + 1 \text{ digit})$
<b>Operating Temperature</b>	Insturment: 0°C-15°C Probe: -20°C-100°C
<b>Display</b>	0,5 inch LCD with LED backlight, 4 Digits

b. Tachometer

Tachometer digunakan untuk mengukur kecepatan putar suatu benda. Tachometer yang digunakan dalam penelitian ini merupakan tachometer digital jenis *Economical Non-Contact Pocket Optical Tachometer* (ENCPOT) seri **OMEGA HHT12** dengan akurasi pembacaan 0.01% atau  $\pm 1$  digit dengan range pengukuran antara 5 hingga 99.999 rpm. Spesifikasi dari tachometer digital OMEGA HHT12 dapat dilihat pada Tabel 3.4.



**Gambar 3.8** Tachometer OMEGA HHT-12

**Tabel 3.4** Spesifikasi Tachometer Digital OMEGA HHT-12

<b>OMEGA HHT-12</b>	
<b>Range</b>	5 to 99.999 rpm
<b>Accuracy</b>	0,01 % of reading or $\pm 1$ digit
<b>Resolution</b>	0,001 to 1,0 rpm
<b>Display</b>	5-digit alphanumeric LCD
<b>Memory</b>	Max, min and last
<b>Power</b>	2 "AA" 1,5 V dc batteries
<b>Environmental</b>	5 to 40° C

c. Torsimeter

Torsimeter digunakan untuk mengukur torsi statis dari suatu poros. Torsimeter yang digunakan dalam penelitian ini ialah seri **LUTRON TQ-8800** dengan *high resolution* 0,1 Newton-cm. Spesifikasi dari torsimeter LUTRON TQ-8800 dapat dilihat pada Tabel 3.5.





**Gambar 3.9** Torsimeter LUTRON TQ-8800

**Tabel 3.5** Spesifikasi Torsimeter LUTRON TQ-8800

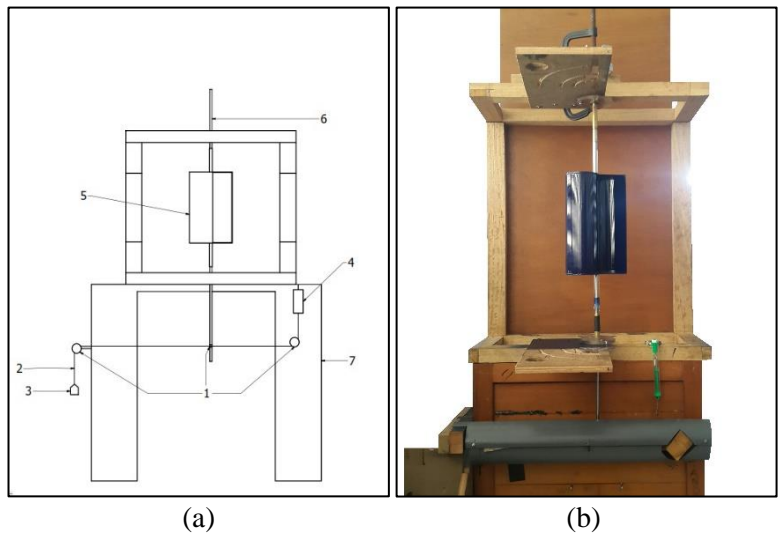
Display Unit/ Resolution			
Unit	Max. range	High resolution	Over load protection range
kg-cm	15 kg-cm	0,01 kg-cm	22,5 kgf-cm max
Lb-inch	12,99 Lb-inch	0,01 Lb-inch	19,53 Lbf-inch max
N-cm	147,1 N-cm	0,1 N-cm	220,1 N-cm max

d. *Brake Dynanometer*

*Brake dynamometer* digunakan mengukur torsi dinamis yang dihasilkan oleh putaran suatu objek. Pengukuran torsi dinamis tidak dapat dilakukan secara langsung melainkan dengan membaca pengukuran variabel lain untuk kemudian dilakukan perhitungan torsi dinamis. Sistem *brake dynamomter* yang digunakan dalam penelitian ini mengacu pada penelitian yang dilakukan oleh **Mahmoud (2010)**. Sistem ini terdiri dari pegas dan pemberat yang dihubungkan oleh sebuah benang nilon. Sebuah piringan cakram yang terhubung dengan poros dilitkan dengan benang tersebut.

Pembacaan massa pemberat dan pegas dilakukan untuk menghitung torsi dinamis yang dihasilkan turbin angin Savonius. Adapun skema *brake dynamometer* dapat

dilihat pada Gambar 3.10. Massa b dibentuk menggulung dengan nilai massa yang beragam, yaitu 1 gram, 2 gram, 4 gram, 5 gram, 10 gram, 20 gram, 25 gram, 50 gram, dan 100 gram. Adapun pegas dan benang nilon yang digunakan memiliki spesifikasi seperti pada Tabel 3.6 dan Tabel 3.7.



**Gambar 3.10** Skema pengukuran *brake dynamometer*: (a) Skema desain awal; (b) Foto dari skema *brake dynamometer*

**Tabel 3.6** Spesifikasi Pegas

SPECIFICATIONS	
Range	0 to 5 N ; 0 to 500 g
Resolution	1 N ; 10 g

**Tabel 3.7** Spesifikasi Benang Nilon DAMYL

SPECIFICATIONS	
Kekuatan	20 lbs ;
Diameter	0,45 mm



(a)



(b)

**Gambar 3.11** (a) neraca pegas dan (b) pemberat

e. Timbangan

Timbangan digunakan untuk mengukur massa pemberat pada *brake dynamometer*. Timbangan yang digunakan dalam penelitian ini adalah timbangan digital **Shimadzu ELB 300** yang mampu mengukur massa dalam satuan gram. Spesifikasi dari timbangan digital Shimadzu ELB 300 dapat dilihat pada Tabel 3.8.



**Gambar 3.12** Timbangan Shimadzu ELB 300

**Tabel 3.8** Spesifikasi timbangan Shimadzu ELB 300

<b>Shimadzu ELB 300</b>	
<b>Capacity</b>	300 g
<b>Minimum Display</b>	0,01 g

Standard Deviation	0,01 g
Linearity Errors	$\pm 0,01$ g
Working Temperature	5-40°C
Pan Size	Ø 110 mm

f. *Multimeter*

Multimeter digunakan untuk mengukur besarnya voltase yang digunakan untuk menggerakan *axial fan*. Hal ini bertujuan untuk menjaga aliran asupan daya listrik yang dialirkan ke *axial fan* agar terjaga konstan. Multimeter yang digunakan adalah **SANWA PC7000 Digital Multimeter**. Adapun spesifikasi lebih detail dapat dilihat pada Tabel 3.9.



**Gambar 3.13** SANWA PC7000 Digital Multimeter

**Tabel 3.9** Spesifikasi multimeter digital SANWA PC7000

SPECIFICATIONS	
Measurement Type	ACV
Range	500mV – 1000V
Best Accuracy	$\pm(0,5\%+40)$
Resolution	0,01 mV
Input Impedance	10M $\Omega$
Bandwith	V: 1kHz – 20kHz (below 500V) A: 40Hz – 1kHz
Size	184 X 86 X 52 mm

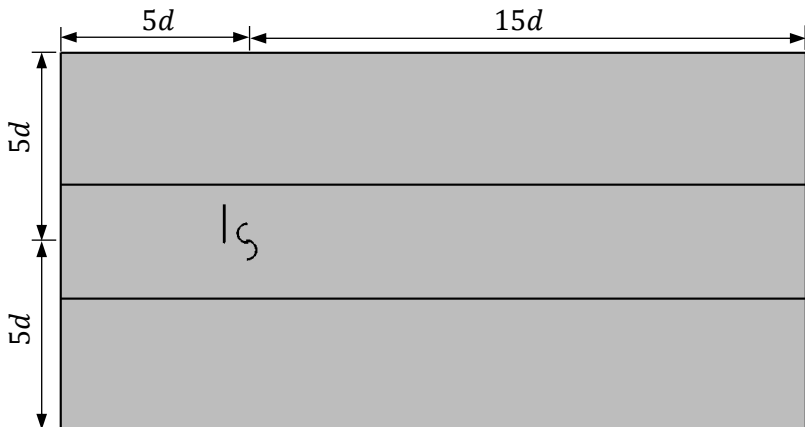
### 3.3.5 Pelumas

Pelumas digunakan untuk mengurangi kerugian akibat gesekan pada bagian-bagian turbin angin savonius. Pelumas yang digunakan pada penelitian ini adalah **REXCO 50 Multipurpose Lubricant**. Pemberian pelumas digunakan terutama pada bagian *bearing* turbin angin savonius setiap pengambilan data dan perubahan variasi sudut plat penghlang.



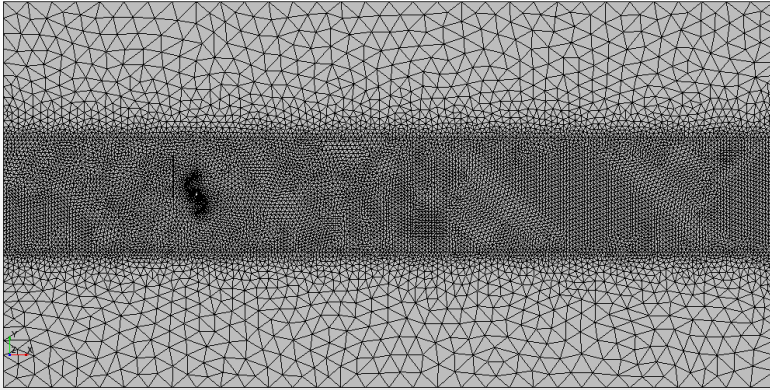
**Gambar 3.14** REXCO 50 Multipurpose Lubricant

### 3.4 Pengaturan Analisis Numerik

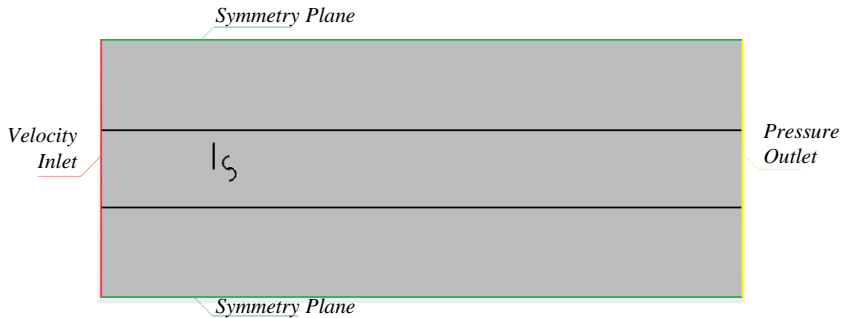


**Gambar 3.15** Geometri simulasi turbin angin Savonius

Analisis numerik dilakukan menggunakan *software* STAR-CCM+ 9.02.007-R8 pada turbin angin Savonius dengan dan tanpa plat penghalang. Adapun *domain* yang digunakan dalam simulasi ini merupakan *static domain*. Geometri dalam simulasi ini ditunjukkan pada Gambar 3.15. Ukuran geometri domain mengacu pada panjang diameter turbin ( $d=190,2$  mm).



**Gambar 3.16** Meshing turbin angin Savonius



**Gambar 3.17** Boundary condition simulasi turbin angin Savonius

Gambar 3.16 dan Gambar 3.17 menunjukkan *meshing* dan *boundary conditions* dari simulasi turbin angin Savonius. Pembuatan *meshing* dilakukan dengan operasi *automated mesh* dan

bentuk *tetrahedral mesh*. Ukuran *meshing* dibuat lebih kecil pada *domain* bagian tengah dimana analisis aliran difokuskan pada bagian tersebut. Sedangkan, *boundary conditions* pada penelitian ini terdiri dari *velocity inlet* pada bagian *inlet* dan *pressure outlet* pada bagian *outlet*. Kecepatan aliran pada *velocity inlet* diatur sebesar 7,48 m/s pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ . Nilai *turbulent intensity* yang digunakan ialah sebesar 0,01 dengan *turbulent length scale* mengacu pada *velocity magnitude* dengan metode *field factor*.

**Tabel 3.10** Pemodelan simulasi turbin angin Savonius

<b>OPERATION</b>	
<b>Operation Type</b>	<i>Automated Mesh</i>
<b>Parameter</b>	<i>Segregated Flow</i> <i>Turbulent</i> <i>k-epsilon realizable turbulence modelling</i> <i>Implicit Unsteady</i> <i>Constant Density</i>
<b>PHYSICS MODEL</b>	
<b>Model</b>	<i>Gas</i>
<b>Density</b>	$1,172 \text{ kg/m}^3$ ( <i>constant</i> )
<b>Dynamic Viscosity</b>	$1,852 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^3$ ( <i>constant</i> )
<b>BOUNDARY CONDITIONS</b>	
<b>Inlet Velocity</b>	7,48 m/s ( $\text{Re} = 9,0 \times 10^4$ )
<b>Turbulent Intensity</b>	0,01
<b>Turbulent Length Scale</b>	<i>Field Function (Velocity Magnitude)</i>

Pemodelan aliran yang digunakan pada simulasi ini adalah *segregated flow* dengan *turbulence modelling k-epsilon realizable* serta parameter *constant density* dan *implicit unsteady* dengan skema diskretisasi *second order upwind*. Pemodelan ini dipilih

karena mampu melakukan menjalankan analisis dengan cakupan yang cukup luas. Diskretisasi *time step* yang digunakan adalah *second order*. Kemudian, dipih fluida kerja berupa gas dengan *density*  $1,172 \text{ kg/m}^3$  dan *dynamic viscosity*  $1,852 \times 10^{-5} \text{ Ns/m}^2$ . Secara umum, pemodelan yang digunakan dalam simluasi ini ditampilkan dalam Tabel 3.10.

### 3.5 Prosedur Penelitian

Untuk melakukan penelitian ini digunakan prosedur pengambilan data penelitian sebagai berikut:

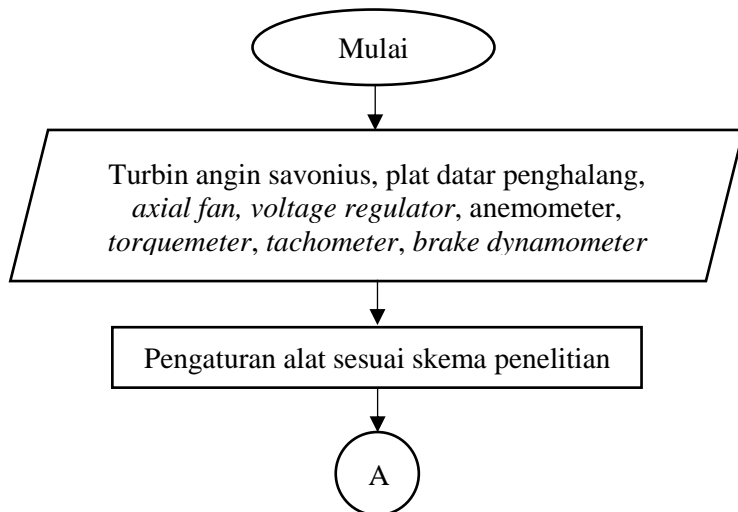
1. Pengaturan peralatan dan benda uji yang akan digunakan.
2. Mengukur temperatur udara dan menghitung kecepatan angin yang dibutuhkan untuk bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ .
3. Menyalakan *fan*
4. Mengatur besar tegangan menggunakan *voltage regulator* sehingga didapatkan nilai kecepatan angin yang diharapkan.
5. Mengukur kecepatan angin dengan menggunakan anemometer untuk mendapatkan bilangan Reynolds yang diinginkan, yaitu  $3,0 \times 10^4$ .
6. Mengukur kecepatan putar turbin angin Savonis tanpa beban pemberat menggunakan *tachometer*.
7. Mengukur torsi statis turbin angin Savonis tanpa beban pemberat menggunakan *torque meter*
8. Menambahkan beban pemberat sebesar 1 gram
9. Mengukur torsi dinamis menggunakan *brake dyamometer* dengan cara mengukur massa pegas pada neraca pegas dan massa beban pemberat.
10. Mengukur kecepatan putar turbin angin Savonius menggunakan *tachometer*
11. Mengulangi langkah 8-10 dengan penambahan beban pemberat sebesar 1 gram hingga turbin berhenti berputar. Nilai *coefficient of power* diperoleh dengan mengalikan putaran torsi dinamis dan kecepatan puataran turbin dan diambil nilai *coefficient of power* maksimum.

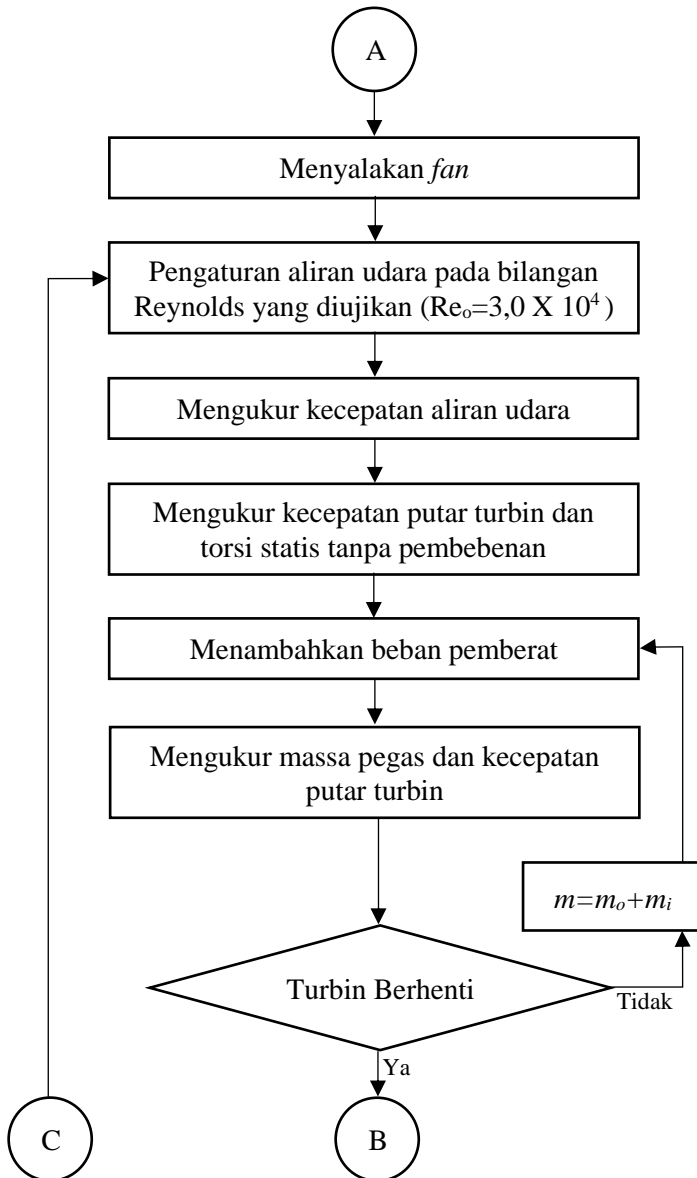


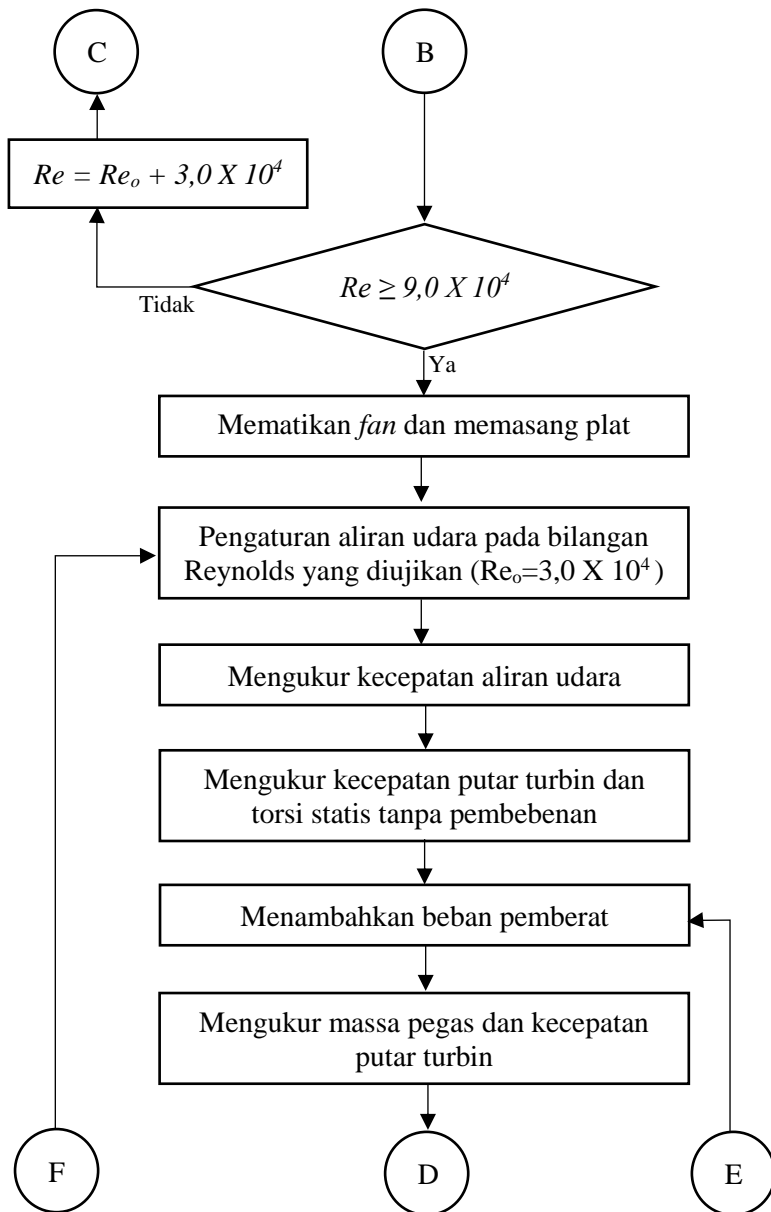
12. Mengulangi langkah 4 sampai 11 dengan mengatur kecepatan angin pada bilangan Reynolds  $6.0 \times 10^4$  dan  $9.0 \times 10^4$  dengan penambahan beban pemberat pada bilangan Reynolds  $6.0 \times 10^4$  sebesar 5 gram dan pada bilangan Reynolds  $9.0 \times 10^4$  sebesar 10 gram.
13. Mematikan *fan*.
14. Memasang plat penghalang di depan *returning blade*.
15. Mengulangi langkah 3 sampai 13 dengan memvariasikan sudut plat penghalang sebesar  $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$  dengan kenaikan sudut setiap  $5^\circ$ .
16. Mematikan *fan*.
17. Mengolah semua data yang diperoleh (putaran dan torsi dinamis) dan melakukan *plotting* grafik.
18. Membandingkan hasil data yang diperoleh antara turbin angin Savonius dengan plat penghalang dan turbin angin Savonius tanpa plat penghalang.

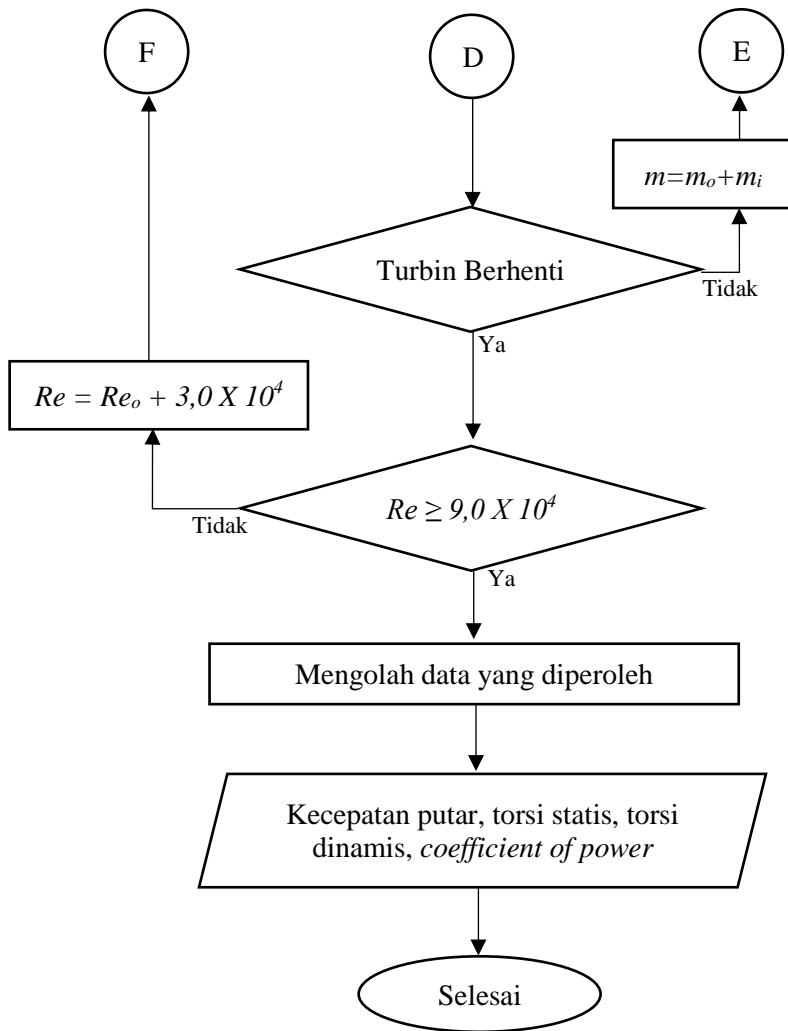
### 3.6 Flowchart Penelitian

Urutan langkah yang akan dilakukan dalam penelitian ini dapat digambarkan dalam diagram alir sebagai berikut :









### 3.7 Alokasi Waktu Penelitian

Perencanaan waktu penelitian ditampilkan dalam bentuk *Gantt chart* pada Tabel 3.11.

**Tabel 3.11** *Gantt chart* perencanaan waktu penelitian

No	Kegiatan	Des	Jan	Feb	Mar	Apr	Mei	Jun	Jul
1	Studi Pustaka								
2	Persiapan Alat Uji								
3	Setting Alat Ukur								
4	Pengambilan Data								
5	Penulisan Proposal TA								
6	Ujian Proposal TA								
7	Penulisan Laporan TA								
8	Ujian TA								

*“ halaman ini sengaja dikosongkan ”*

## BAB IV ANALISIS DATA DAN PEMBAHASAN

Bab ini berisi tentang analisis data dan pembahasan dari hasil pengambilan data yang telah dilakukan. Diperoleh data yang menunjukkan pengaruh pemberian plat datar penghalang terhadap performa turbin angin Savonius. Data yang diperoleh berupa nilai kecepatan putar turbin, torsi statis, dan *coefficient of power* yang dihasilkan oleh turbin angin Savonius dengan dan tanpa plat datar penghalang.

### 4.1 Kecepatan Aliran Udara

Nilai kecepatan aliran udara diperoleh dari persamaan bilangan Reynolds pada nilai  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$  dengan membandingkan keadaan pada saat pengambilan data terhadap keadaan standar dalam persamaan Boyle-Gay Lussac dan persamaan Sutherland. Fluida kerja berupa udara pada tekanan atmosfer diasumsikan *steady* dan merupakan *incompressible flow* dengan nilai keadaan sebagai berikut:

1. Temperatur udara dalam keadaan standar ( $T_{\text{std}} = 288,2 \text{ K}$ )
2. Massa jenis udara dalam keadaan standar ( $\rho_{\text{std}} = 1,225 \text{ kg/m}^3$ )

Massa jenis udara pada saat pengambilan data dapat dihitung menggunakan persamaan (2.18) dengan keadaan 1 merupakan keadaan standar yang telah disebutkan di atas dan keadaan 2 merupakan keadaan pengujian pada temperatur ruang sebesar  $28,2^\circ\text{C}$  atau sama dengan  $301,2 \text{ K}$ . Sehingga, diperoleh massa jenis udara sebagai berikut:

$$\rho_2 = \frac{T_1 \rho_1}{T_2}$$
$$\rho_2 = \frac{288,2 \text{ K} \times 1,225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{301,2 \text{ K}} = 1,172 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Sedangkan, viskositas dinamis fluida diperoleh dari persamaan (2.19) pada temperatur 301,2 K. Sehingga diperoleh viskositas dinamis udara sebagai berikut:

$$\mu = \frac{C T^{1.5}}{S + T}$$

$$\mu = \frac{1,458 \times 10^{-6} \frac{kg}{m.s.K^{0.5}} \times 301,2^{1.5}}{110,4 K + 301,2 K}$$

$$\mu = 1,852 \times 10^{-5} \frac{kg}{m.s}$$

Sehingga, nilai kecepatan aliran udara yang dibutuhkan untuk bilangan Reynolds yang diinginkan dapat dihitung menggunakan persamaan (2.20) dengan nilai massa jenis dan viskositas dinamis udara di atas dan panjang karakteristik turbin (b) sebesar 190,2 mm. Diperoleh nilai kecepatan aliran udara seperti pada Tabel 4.1.

**Tabel 4.1** Kecepatan aliran udara pada tiga bilangan Reynolds

Bilangan Reynolds	Kecepatan aliran udara (m/s)
$3,0 \times 10^4$	2,49
$6,0 \times 10^4$	4,98
$9,0 \times 10^4$	7,48

## 4.2 Contoh Perhitungan

Contoh perhitungan digunakan untuk menunjukkan bagaimana pengolahan data dalam penelitian ini sehingga diperoleh nilai seperti pada lampiran. Adapun data yang digunakan untuk contoh perhitungan ini ialah data pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan dengan penambahan plat datar penghalang dengan sudut penempatan plat sebesar  $50^\circ$ .



**Tabel 4.2** Data pengukuran pada kondisi  $Re = 6,0 \times 10^4$  dan  $\theta = 50^\circ$

Kondisi pengujian	Kecepatan putar turbin ( $n$ )	Massa neraca pegas ( $m$ )	Massa beban ( $s$ )	Kecepatan aliran udara ( $U$ )
$Re = 6,0 \times 10^4$ $\theta = 50^\circ$	284,2 rpm	45 gram	200 gram	4,98 m/s

#### 4.2.1 Perhitungan Torsi Dinamis

Torsi dinamis diperoleh dari selisih gaya yang bekerja pada *disc* yang terhubung dengan poros turbin angin Savonius kemudian dikalikan dengan lengan yang merupakan jari-jari *disc*. Perhitungan torsi dinamis dapat menggunakan persamaan berikut:

$$T_d = (s - m)gR$$

dimana:  $T_d$  = torsi dinamis ( $Nm$ )

$s$  = massa neraca pegas ( $kg$ )

$m$  = massa pemberat ( $kg$ )

$g$  = percepatan gravitasi ( $m/s^2$ )

$R$  = jari-jari *disc* ( $m$ )

$$T_d = (200 - 45)gr \times 9,81 \frac{m}{s^2} \times 10,5 mm \times \left| \frac{1N}{\frac{1kg m}{s^2}} \right|$$

$$\times \left| \frac{1kg}{10^3 gr} \right| \times \left| \frac{1m}{10^3 mm} \right|$$

$$T_d = 0,01597 Nm$$

$$T_d = 1,597 N cm$$

#### 4.2.2 Perhitungan Coefficient of Power

*Coefficient of Power* (CoP) merupakan rasio daya yang dihasilkan oleh turbin terhadap daya angin yang digunakan. Perhitungan CoP dapat menggunakan persamaan (2.10) seperti berikut:

$$CoP = \frac{(s - m)gR \frac{2\pi n}{(60 s)}}{\frac{1}{2}\rho AU^3}$$

$$CoP = \frac{0,01597 Nm \times 284,22 rpm \times \left| \frac{2\pi/60 s}{1 rpm} \right| \times \left| \frac{1 kg m/s^2}{1 N} \right|}{0,5 \times 1,172 \frac{kg}{m^3} \times 0,05706 m^2 \times 4,98^3 (m/s)^3}$$

$$CoP = 0,1143$$

$$CoP = 11,43\%$$

#### 4.2.3 Perhitungan Tip Speed Ratio

Perhitungan *tip speed ratio* dapat menggunakan persamaan (2.12) berikut:

$$TSR = \frac{\omega R}{U}$$

$$TSR = \frac{nR}{U} \times \left| \frac{2\pi/60 s}{1 rpm} \right|$$

$$TSR = \frac{284,22 rpm \times \frac{190,2 mm}{2} \times \left| \frac{2\pi/60 s}{1 rpm} \right| \times \left| \frac{1 m}{10^3 mm} \right|}{4,98 m/s}$$

$$TSR = 0,57$$

#### 4.3 Analisis Performa Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang

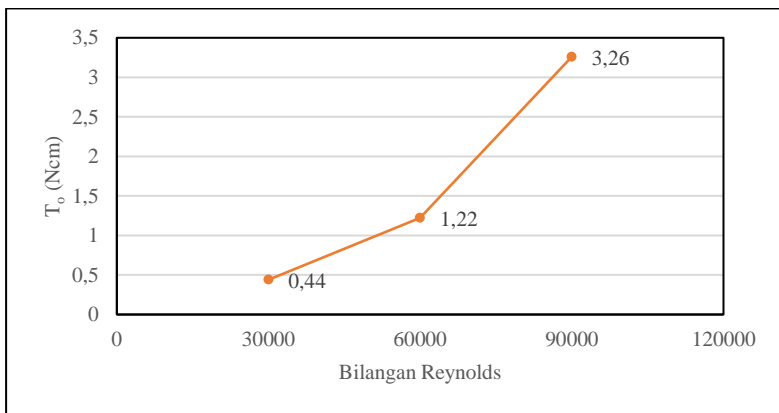
Analisis performa turbin angin savonius dilakukan dengan meninjau nilai kecepatan putaran turbin ( $n_o$ ), torsi statis ( $T_o$ ), dan *coefficient of power* ( $CoP_o$ ) pada tiga bilangan Reynolds. Data performa turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang ditunjukkan pada Tabel 4.2. Data ini digunakan sebagai data acuan untuk membandingkan pengaruh penambahan plat datar penghalang terhadap turbin angin Savonius.

**Tabel 4.3** Data peforma turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang

Re	$n_o$ (rpm)	$T_o$ (N.cm)	CoP <sub>o</sub> (%)
$3,0 \times 10^4$	206,97	0,44	3,25
$6,0 \times 10^4$	393,04	1,22	5,18
$9,0 \times 10^4$	567,98	3,26	3,05

#### 4.3.1 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang

Gambar 4.1 menunjukkan torsi statis turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ . Torsi statis terbesar diperoleh pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  yaitu sebesar 3,26 Ncm. Pada bilangan Reynolds yang lebih kecil, nilai torsi statisnya mengalami penurunan yaitu bernilai 1,22 Ncm pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan 0,44 Ncm pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ .



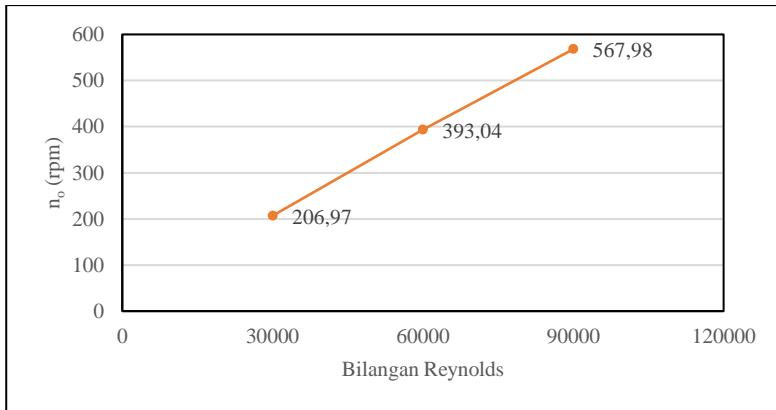
**Gambar 4.1** Torsi statis turbin angin savonius tanpa plat penghalang

Dari Gambar 4.1 terlihat bahwa nilai torsi statis turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang meningkat seiring dengan

kenaikan bilangan Reynolds. Hal ini disebabkan karena peningkatan kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius. Dari persamaan (2.20) didapatkan bahwa bilangan Reynolds akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran udara. Meningkatnya kecepatan aliran udara akan meningkatkan gaya *drag* yang bekerja pada sudu-sudu turbin angin Savonius sesuai persamaan (2.2). Akibat perbedaan koefisien *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* dimana koefisien *drag* bernilai lebih besar pada *advancing blade*, perbedaan gaya *drag* menjadi lebih besar sehingga torsi statis turbin angin Savonius mengalami kenaikan.

#### 4.3.2 Analisis Kecepatan Putar Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang

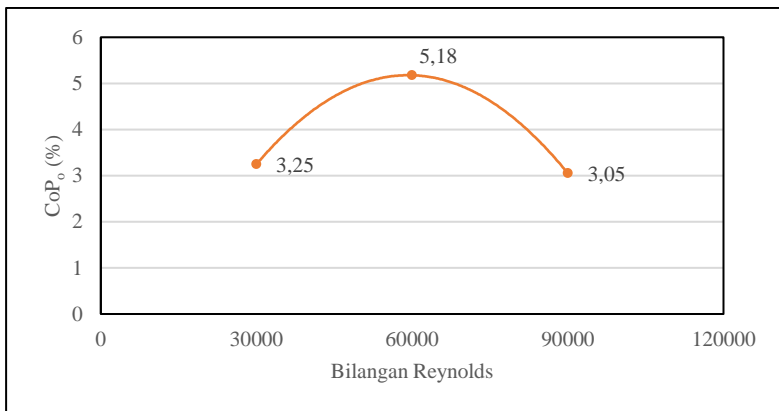
Gambar 4.2 menunjukkan kecepatan putar turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ . Masing-masing bilangan Reynolds secara urut menghasilkan kecepatan putar turbin sebesar 206,97 rpm, 393,04 rpm, dan 567,98 rpm.



**Gambar 4.2** Kecepatan putar turbin angin Savonius tanpa plat penghalang

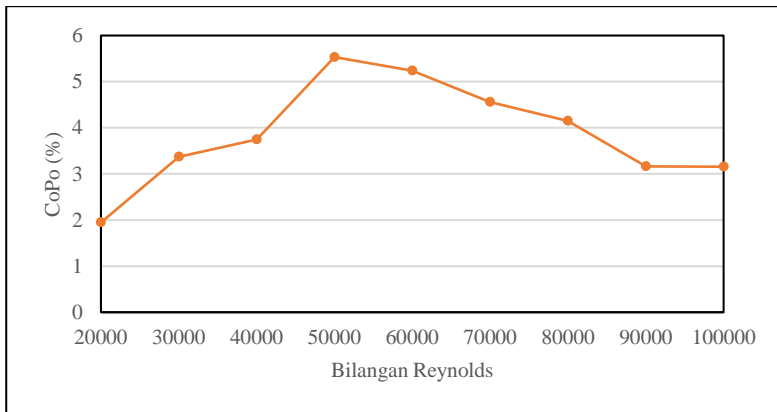
Dari Gambar 4.2 terlihat bahwa kenaikan bilangan Reynolds diiringi oleh kenaikan kecepatan putar turbin. Kenaikan nilai kecepatan putar turbin ini disebabkan oleh kenaikan kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius. Hal ini sesuai dengan persamaan (2.20) dimana bilangan Reynolds akan mengalami peningkatan seiring dengan meningkatnya kecepatan aliran udara. Meningkatnya kecepatan aliran udara juga akan meningkatkan gaya drag yang bekerja pada sudu-sudu turbin serta daya kinetis yang dibawa oleh fluida udara sesuai dengan persamaan (2.6). Akibat perbedaan koefisien *drag* antara *advancing blade* dan *returning blade* dimana koefisien *drag* bernilai lebih besar pada *advancing blade*, perbedaan gaya *drag* menjadi lebih besar dan memberikan daya yang lebih besar pula. Akibat kenaikan daya kinetis, turbin akan mengubah daya mekanis lebih besar lagi yang ditandai dengan kenaikan kecepatan putar turbin.

#### 4.3.3 Analisis *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Tanpa Plat Datar Penghalang



**Gambar 4.3** *Coefficient of power* turbin angin savonius tanpa plat penghalang

Gambar 4.3 menunjukkan *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang ( $CoP_o$ ) pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ . Terlihat bahwa nilai  $CoP_o$  mengalami kenaikan dan penurunan pada bilangan Reynolds yang berbeda. Pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  diperoleh nilai  $CoP_o$  sebesar 3,25%. Kemudian, nilai  $CoP_o$  mengalami kenaikan pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  hingga mencapai nilai 5,18% dan mengalami penurunan pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  hingga mencapai nilai 3,05%.

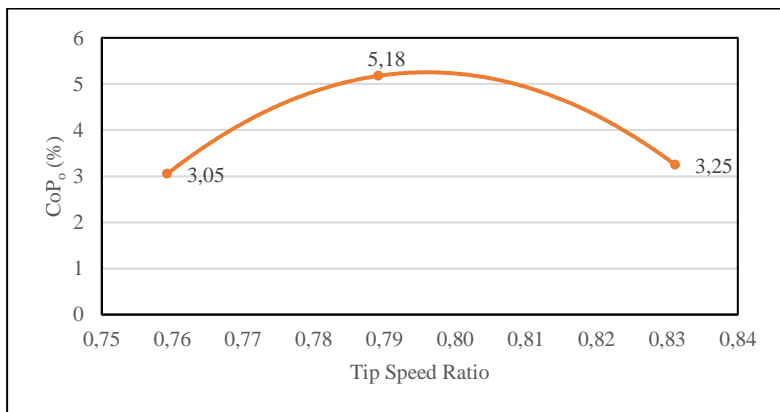


**Gambar 4.4** *Coefficient of power* turbin angin savonius tanpa plat penghalang pada beragam bilangan Reynolds

Kenaikan dan penurunan nilai  $CoP_o$  dikarenakan kemampuan turbin angin Savonius untuk mengubah daya kinetis dari aliran udara menjadi daya mekanis turbin. Daya kinetis angin mengalami peningkatan seiring dengan kenaikan nilai bilangan Reynolds sesuai persamaan (2.6) dan (2.20). Di sisi lain, peningkatan daya mekanis turbin akibat peningkatan kecepatan aliran udara tidak lebih besar dibandingkan peningkatan daya kinetis angin. Akibatnya, kenaikan daya kinetis tidak selalu diikuti oleh kenaikan nilai  $CoP_o$ , hal ini sesuai dengan persamaan (2.9). Nilai  $CoP_o$  akan mencapai nilai maksimum pada bilangan Reynolds

optimumnya. Gambar 4.4 menunjukkan pengaruh beragam bilangan Reynolds terhadap nilai  $CoP_o$ . Dari Gambar 4.4 terlihat bahwa nilai  $CoP_o$  mengalami peningkatan dan penurunan pada beragam bilangan Reynolds. Nilai  $CoP_o$  maksimum diperoleh pada bilangan Reynolds  $5,0 \times 10^4$ . Pada bilangan Reynolds yang diujikan, nilai  $CoP_o$  paling tinggi diperoleh pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$ .

Kemampuan turbin angin Savonius untuk mengubah daya kinetis dari aliran udara menjadi daya mekanis turbin dapat dianalisis dengan variabel tidak berdimensi *tip speed ratio*. Gambar 4.5 menunjukkan pengaruh *tip speed ratio* terhadap  $CoP_o$ . *Tip speed ratio* terendah diperoleh pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 0,76 dan mengalami peningkatan pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  menjadi 0,79. Kemudian, nilai *tip speed ratio* mengalami penurunan pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  menjadi 0,83. Nilai  $CoP_o$  terbesar tidak diperoleh pada nilai *tip speed ratio* tertinggi melainkan pada *tip speed ratio* 0,79, diantara *tip speed ratio* terendah dan tertinggi. Hal ini menunjukkan bahwa  $CoP_o$  memiliki nilai *tip speed ratio* optimum seperti pada pembahasan  $CoP_o$  sebelumnya.



**Gambar 4.5** Pengaruh *tip speed ratio* terhadap *coefficient of power* turbin angin Savonius tanpa plat penghalang

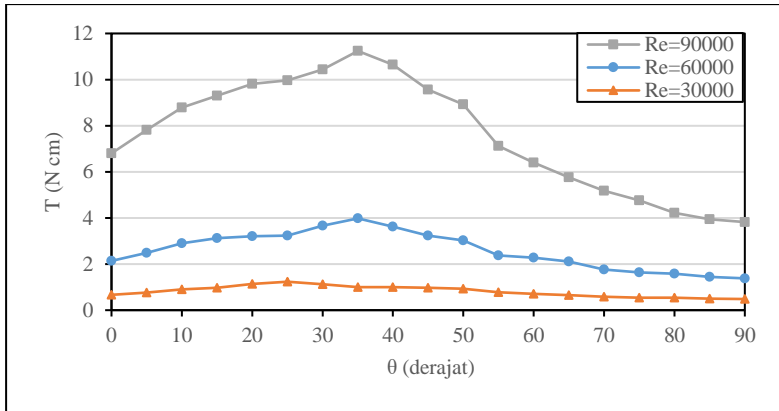
#### **4.4 Analisis Performa Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan *Returning Blade***

Analisis performa turbin angin savonius dengan plat penghalang dilakukan dengan meninjau nilai kecepatan putaran turbin ( $n$ ), torsi statis ( $T$ ), dan *coefficient of power* (CoP) terhadap performa turbin angin savonius dengan plat penghalang pada tiga bilangan Reynolds. Analisis disajikan dalam perbandingan kenaikan kecepatan putaran turbin ( $n/n_0$ ), torsi statis ( $T/T_0$ ), dan *coefficient of power* ( $CoP/CoP_0$ ). Pengaruh penambahan plat penghalang dianalisis dengan memvariasikan sudut penempatan plat datar penghalang pada rentang  $0^\circ$  hingga  $90^\circ$  dengan kenaikan tiap  $5^\circ$  dalam bilangan Reynolds yang sama dengan kondisi tanpa plat penghalang.

##### **4.4.1 Analisis Torsi Statis Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan *Returning Blade***

Gambar 4.6 menunjukkan pengaruh sudut penempatan plat datar penghalang terhadap torsi statis turbin angin Savonius ( $T$ ). Pengambilan data torsi statis diambil pada posisi bukaan sudu turbin ( $\alpha$ ) sebesar  $0^\circ$ . Nilai torsi statis mengalami kenaikan hingga mencapai nilai  $\theta$  tertentu. Kemudian, nilai torsi statis mengalami penurunan hingga mencapai  $\theta=90^\circ$ . Torsi statis terbesar diperoleh pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 11,24 Ncm pada  $\theta=35^\circ$ . Pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $3,0 \times 10^4$ , torsi statis terbesar diperoleh pada nilai 3,98 pada  $\theta=35^\circ$  dan 1,23 pada  $\theta=25^\circ$  secara berurutan. Nilai torsi statis pada ketiga bilangan Reynolds menunjukkan bahwa semakin besar bilangan Reynolds maka akan semakin besar pula nilai torsi statisnya.

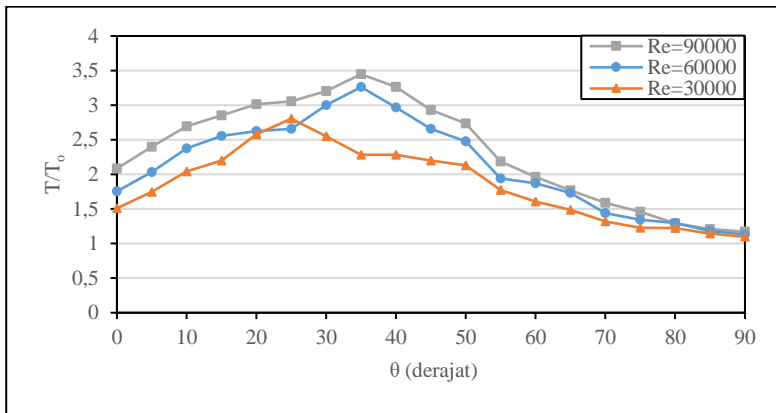




**Gambar 4.6** Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap torsi statis turbin angin Savonius

Penambahan plat datar penghalang menyebabkan arah aliran udara menuju *returning blade* tertahan oleh plat penghalang dan sebagian mengalir menuju *advancing blade*. Kecepatan aliran udara setelah dibelokkan oleh plat penghalang mengalami peningkatan. Akibatnya, gaya *drag* yang dihasilkan semakin besar sesuai persamaan (2.2). Adapun perbedaan sudut penempatan plat penghalang mempengaruhi arah aliran udara menuju *advancing blade* dan menggeser pusat gaya *drag* pada turbin. Penambahan sudut penempatan plat penghalang melewati sudut optimumnya akan menggeser pusat gaya *drag* menuju poros turbin. Hal ini berarti lengan torsi yang bekerja juga bergeser dan menjadi semakin pendek. Sebaliknya, penambahan sudut penempatan plat penghalang menuju sudut optimumnya akan memperpanjang lengan torsi yang bekerja. Pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$  sudut optimum dicapai pada  $\theta=35^\circ$  sehingga pada sudut  $\theta=0^\circ$  hingga  $\theta=35^\circ$  pusat gaya *drag* bergeser menuju ujung dari *advancing blade* yang menyebabkan lengan torsi semakin panjang. Akibatnya torsi statis yang dihasilkan semakin besar. Pada sudut  $\theta>35^\circ$ , pusat gaya *drag* telah bergeser menuju poros turbin yang menyebabkan lengan torsi yang bekerja semakin kecil. Akibatnya,

torsi statis mengalami penurunan. Hal serupa terjadi pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  dimana sudut optimum dicapai pada  $\theta=25^\circ$ . Pada sudut penempatan plat penghalang  $\theta>60^\circ$ , torsi statis bernilai lebih kecil dibanding pada sudut  $\theta=0^\circ$ . Hal ini dikarenakan pada sudut  $\theta>60^\circ$ , plat penghalang tidak lagi menutupi seluruh bagian *returning blade*. Sebagian aliran udara mulai menerobos menuju *returning blade* seiring dengan meningkatnya  $\theta$ . Dengan adanya aliran udara menuju *returning blade*, gaya *drag* kembali muncul dan menghasilkan torsi yang arahnya berlawanan dengan torsi yang dihasilkan *advancing blade*. Akibatnya, selisih torsi yang bekerja menurun. Semakin besar sudut penempatan plat penghalang, selisih gaya drag yang dihasilkan semakin kecil dan torsi stais semakin menurun.

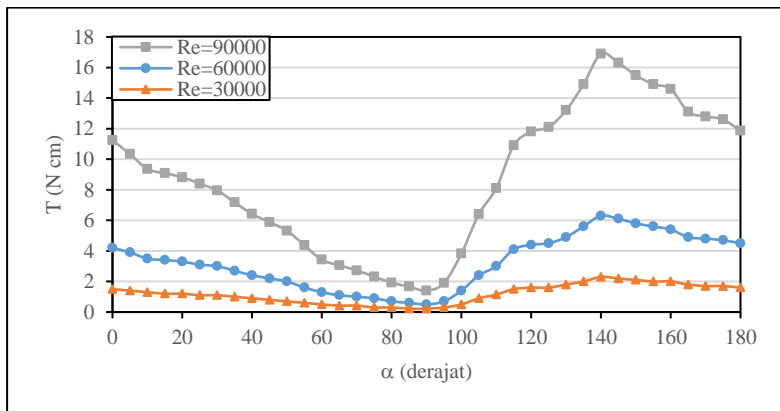


**Gambar 4.7** Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kenaikan nilai torsi statis turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa plat penghalang

Gambar 4.7 menunjukkan kenaikan nilai torsi statis dengan penambahan plat penghalang dibanding torsi statis tanpa plat penghalang ( $T/T_0$ ). Terlihat bahwa kenaikan torsi statis mengalami peningkatan hingga mencapai sudut optimum kemudian mengalami penurunan hingga sudut  $\theta=90^\circ$ . Kenaikan terbesar

dicapai pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  dengan  $T/T_o$  sebesar 3,45 diikuti oleh bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $3,0 \times 10^4$  dengan  $T/T_o$  sebesar 3,26 dan 2,80 secara berurutan. Pada sudut  $\theta=90^\circ$ , besar kenaikan torsi statis semakin mendekati 1 dengan perbedaan nilai  $T/T_o$  yang kecil, yaitu 1,10 pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ , 1,13 pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$ , dan 1,17 pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ .

Secara umum, nilai  $T/T_o$  di semua sudut penempatan plat penghalang selalu bernilai lebih dari 1. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan plat penghalang dengan rasio  $L/D=2$  dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius yang ditunjukkan dengan tidak adanya torsi statis yang bernilai negatif pada semua sudut penempatan plat penghalang. Namun, pada sudut penempatan plat penghalang mendekati sudut  $\theta=90^\circ$  kenaikan torsi statis mendekati nilai  $T/T_o=1$  dikarenakan luasan sudu yang mengalami gaya *drag* pada posisi tersebut hampir sama seperti ketika tanpa plat penghalang. Akibatnya, gaya *drag* pada *returning blade* kembali muncul dan mengurangi torsi statis yang dihasilkan seperti pada pembahasan sebelumnya.



**Gambar 4.8** Pengaruh posisi bukaan sudu turbin terhadap torsi statis turbin angin Savonius

Analisis torsi statis pada beragam bukaan sudu turbin disajikan dalam Gambar 4.8. Pengambilan data dilakukan dengan memvariasikan posisi bukaan sudu turbin ( $\alpha$ ) pada rentang  $0^\circ$  hingga  $180^\circ$  dengan kenaikan tiap  $10^\circ$  pada konfigurasi plat yang menghasilkan torsi statis maksimum, yaitu pada sudut penempatan plat penghalang  $\theta=35^\circ$  untuk bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$ , serta  $\theta=25^\circ$  pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ . Hasil yang diperoleh menunjukkan bahwa nilai torsi statis dengan variasi posisi bukaan sudu turbin membentuk grafik menyerupai kurva sinusoidal dengan nilai tertinggi diperoleh pada  $\alpha=140^\circ$  dan nilai terendah pada  $\alpha=90^\circ$  di semua bilangan Reynolds.

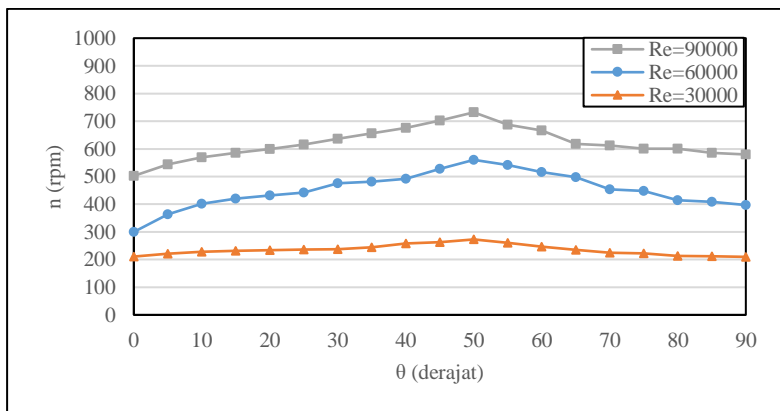
Perubahan nilai torsi statis pada beragam nilai  $\alpha$  banyak dipengaruhi oleh perubahan bentuk sudu turbin dalam arah tangensial terhadap arah aliran udara. Hal ini akan mempengaruhi nilai koefisien *drag* pada sudu. Karena sudut penempatan plat  $\theta=35^\circ$  dan plat penghalang masih menutupi sisi *returning blade* maka pengaruh gaya *drag* pada sisi *returning blade* dapat dianggap kecil. Perubahan gaya *drag* didominasi oleh perubahan koefisien drag pada sisi *advancing blade*. Pada posisi  $\alpha=140^\circ$ , koefisien drag pada sisi *advancing blade* bernilai besar dibandingkan pada posisi  $\alpha=90^\circ$  sehingga nilai torsi statis diperoleh maksimum pada posisi  $\alpha=140^\circ$ .

#### **4.4.2 Analisis Kecepatan Putar Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan *Returning Blade***

Gambar 4.9 menunjukkan pengaruh sudut penempatan plat datar penghalang terhadap kecepatan putar turbin angin Savonius (n). Nilai kecepatan putar turbin mengalami kenaikan hingga mencapai nilai  $\theta=50^\circ$ . Kemudian, nilai kecepatan putar turbin mengalami penurunan hingga mencapai  $\theta=90^\circ$ . Kecepatan putar turbin terbesar diperoleh pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 731,98 rpm diikuti kecepatan putar turbin pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  sebesar 560,32 rpm dan pada bilangan

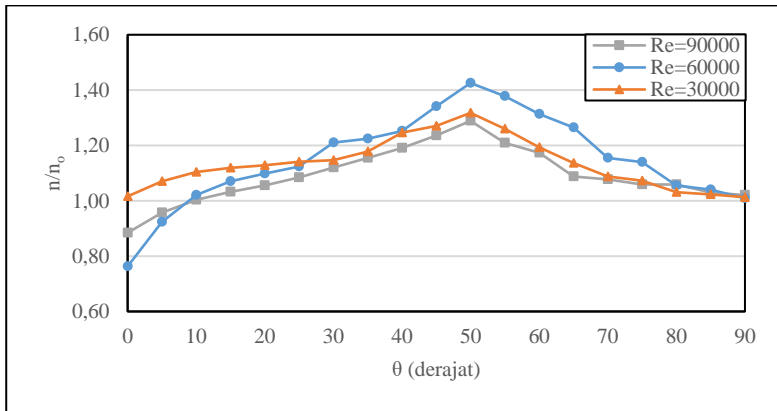
Reynolds  $3,0 \times 10^4$  sebesar 272,72 rpm. Dari Gambar 4.9 terlihat bahwa kecepatan putar turbin bahwa semakin besar bilangan Reynolds maka akan semakin besar pula nilai kecepatan putar turbinnya.

Penambahan plat penghalang di depan *returning blade* akan menghalangi aliran udara menuju *returning blade* sekaligus mengarahkan aliran udara menuju *advancing blade*. Hal ini akan meningkatkan gaya *drag* yang bekerja pada *advancing blade* sekaligus mengurangi gaya *drag* yang bekerja pada *returning blade*. Selain itu, kecepatan aliran udara yang diarahkan menuju *advancing blade* juga mengalami peningkatan. Hal ini menyebabkan daya kinetis udara yang diterima oleh turbin angin Savonius meningkat seiring peningkatan kecepatan aliran udara. Dengan meningkatnya sudut penempatan plat penghalang, aliran udara yang diarahkan menuju *advancing blade* juga meningkat beserta kecepatan aliran udaranya. Hal ini terjadi pada peningkatan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$  hingga  $\theta=50^\circ$ . Peningkatan daya kinetis tersebut diikuti oleh peningkatan daya mekanis turbin yang ditandai dengan peningkatan kecepatan putar turbin sesuai dengan persamaan (2.6) dan (2.8).



**Gambar 4.9** Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kecepatan putar turbin angin Savonius

Kenaikan kecepatan putar turbin dengan dan tanpa plat penghalang disajikan dalam sebuah grafik pada Gambar 4.10. Nilai  $n/n_0$  mengalami peningkatan pada rentang  $\theta=0^\circ$  hingga  $\theta=50^\circ$ . Adapun nilai  $n/n_0$  tertinggi dicapai pada sudut  $\theta=50^\circ$  dengan bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dengan  $n/n_0$  sebesar 1,43 diikuti oleh bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  sebesar 1,32 dan bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 1,29 pada sudut yang sama. Pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$ , nilai  $n/n_0$  bernilai kurang dari 1 pada sudut  $\theta=0^\circ$  dan  $\theta=5^\circ$ . Sedangkan pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  pada sudut yang sama, nilai  $n/n_0$  bernilai lebih dari 1. Pada sudut  $\theta=90^\circ$ , besar kenaikan kecepatan putar turbin hampir bernilai 1 di semua bilangan Reynolds, yaitu 1,02 pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ , dan 1,01 pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  dan  $6,0 \times 10^4$ .



**Gambar 4.10** Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kenaikan nilai torsi statis turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa plat penghalang

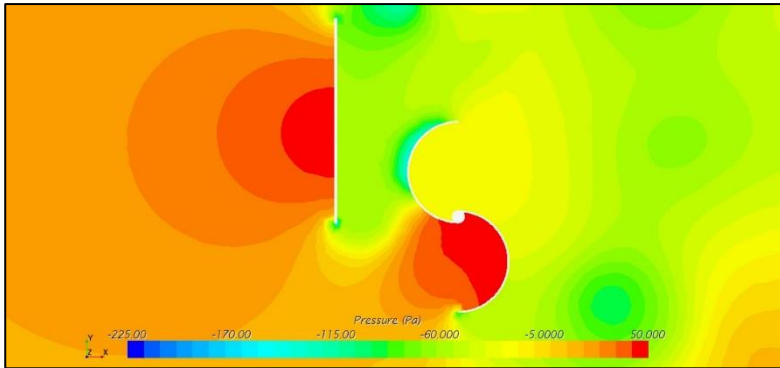
Adanya aliran udara yang menerobos bagian belakang plat penghalang menuju sisi *returning blade* disebabkan oleh *wake* yang terbentuk di ujung sisi plat penghalang. Akibatnya, terjadi kenaikan tekanan di belakang plat penghalang dan sebagian daya

mekanis digunakan untuk melawan pengaruh tersebut. Hal ini menyebabkan daya mekanis yang dihasilkan berkurang dan nilai *coefficient of power* mengalami penurunan. Pada sudut  $\theta > 0^\circ$ , aliran udara sudah diarahkan menuju *advancing blade* sehingga pengaruh aliran udara yang menerobos bagian belakang plat penghalang berkurang dan *coefficient of power* mengalami peningkatan.

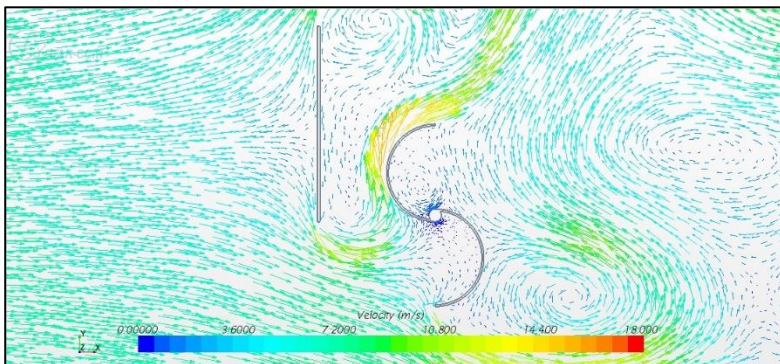
Fenomena pada sudut  $\theta = 0^\circ$  dan  $\theta = 5^\circ$  dimana nilai  $n/n_0 < 1$  disebabkan karena adanya aliran udara yang menerobos bagian belakang plat penghalang menuju sisi *returning blade*. Terbentuknya *wake* di ujung sisi plat penghalang mempengaruhi aliran fluida yang melaluinya. Akibatnya, sisi *returning blade* turbin menerima torsi yang melawan arah torsi pada sisi *advancing blade* yang menyebabkan nilai putarannya menurun. Simulasi aliran fluida yang melewati turbin angin Savonius dengan plat penghalang ditampilkan pada Gambar 4.11 hingga Gambar 4.20. Simulasi aliran dilakukan menggunakan *software* STAR-CCM+ dengan membandingkan pola aliran pada kondisi sudut penempatan plat penghalang  $\theta = 0^\circ$  dan  $\theta = 35^\circ$  dengan bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  serta kondisi sudut penempatan plat penghalang  $\theta = 0^\circ$  pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$ .

Gambar 4.11 dan Gambar 4.12 menunjukkan hasil simulasi aliran fluida yang melewati turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta = 0^\circ$  dan bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ . Terlihat adanya aliran fluida di ujung plat penghalang yang masuk ke depan sisi *returning blade*. Di sisi lain, sebagian aliran fluida di depan sisi *advancing blade* masuk ke depan sisi *returning blade*. Adanya pertemuan kedua aliran tersebut membentuk *vortex* dan mengarahkan aliran fluida ke *returning blade*. Akibatnya, sisi *returning blade* menerima gaya drag tambahan yang menyebabkan kecepatan putar turbin mengalami penurunan. Pada sudut penempatan plat penghalang  $\theta = 50^\circ$ , aliran fluida juga menerobos masuk ke sisi *returning blade*. Namun, aliran tersebut masih mampu melawan *wake* yang terbentuk sehingga aliran diteruskan keluar sisi *returning blade* dengan pengaruh gaya drag yang lebih

kecil dibandingkan dengan pada sudut penempatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$ . Hal ini ditunjukkan pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14.

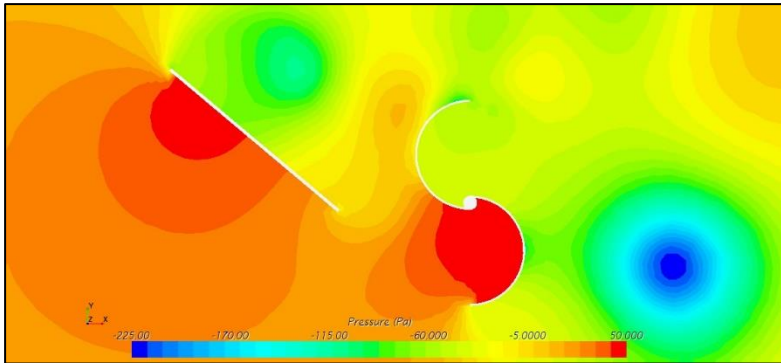


**Gambar 4.11** Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$  pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$

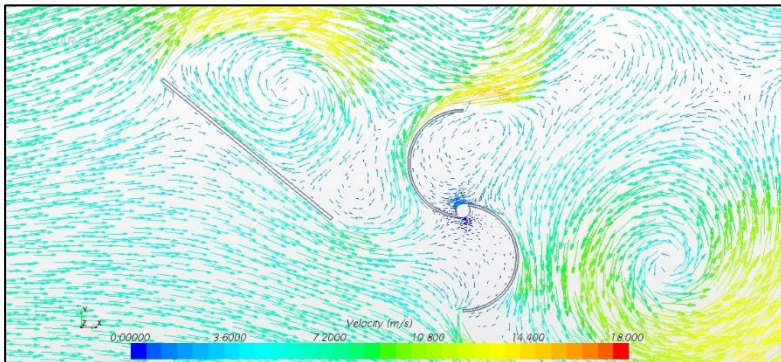


**Gambar 4.12** Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$  pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$





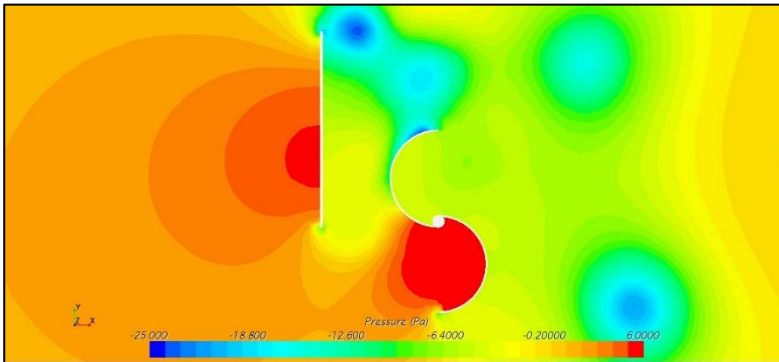
**Gambar 4.13** Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=50^\circ$  pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$



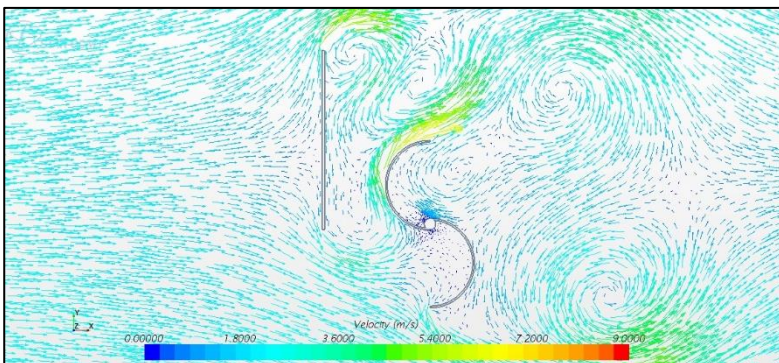
**Gambar 4.14** Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=50^\circ$  pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$

Pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ , pengaruh *wake* yang terjadi lebih kecil dibanding pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ . Hal ini menyebabkan gaya *drag* yang diterima pada sisi *returning blade* tidak seperti pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ . Aliran fluida dari sisi *advancing blade* yang memasuki sisi *returning blade* masih mampu melawan pengaruh *wake* yang terbentuk di

belakang plat penghalang sehingga performa turbin tidak menurun seperti pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ . Simulasi aliran fluida yang melewati turbin angin Savonius dengan plat penghalang dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$  dan bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  ditunjukkan pada Gambar 4.15 dan Gambar 4.16.



**Gambar 4.15** Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$  pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$



**Gambar 4.16** Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$  pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$

Secara umum, nilai  $n/n_0$  di semua sudut penempatan plat penghalang bernilai lebih dari 1 pada sudut penempatan plat penghalang  $\theta > 10^\circ$ , terutama pada bilangan Reynolds yang lebih besar yaitu  $6,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$ . Hal ini menunjukkan bahwa penambahan plat penghalang dengan rasio  $L/D=2$  mampu meningkatkan performa turbin angin Savonius pada sudut penempatan plat penghalang tertentu dikarenakan adanya fenomena *wake* yang mempengaruhi aliran udara yang melalui turbin angin Savonius, khususnya pada bilangan Reynolds yang lebih besar. Namun, pada sudut penempatan plat penghalang mendekati sudut  $\theta=90^\circ$  kenaikan kecepatan putar turbin mendekati nilai  $n/n_0=1$  dikarenakan luasan sudu yang mengalami gaya *drag* pada posisi tersebut hampir sama seperti ketika tanpa plat penghalang. Akibatnya, gaya *drag* pada *returning blade* kembali muncul dan mengurangi selisih torsi yang dihasilkan turbin sehingga kecepatan putar turbin berkurang. Hal ini terlihat pada gambar 4.17 hingga Gambar 4.20.

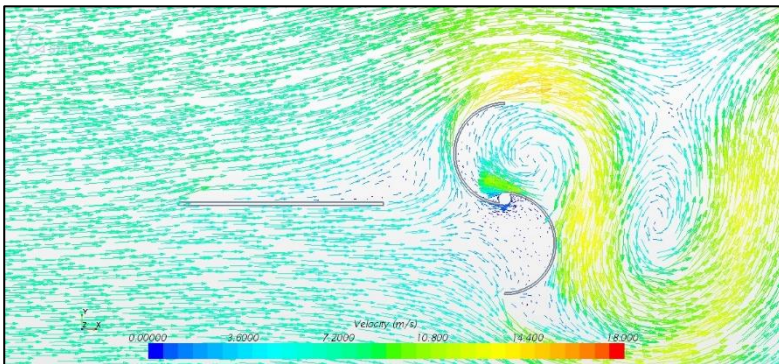
Gambar 4.17 dan Gambar 4.18 menunjukkan menunjukkan kontur tekanan dan vektor kecepatan aliran fluida yang melewati turbin angin Savonius dengan plat penghalang dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=90^\circ$  dan bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ . Terlihat bahwa luasan yang menerima aliran fluida pada sisi *returning blade* hampir sama seperti kondisi tanpa plat penghalang yang ditunjukkan oleh Gambar 4.19 dan Gambar 4.20. Namun, terdapat aliran fluida yang terpecah bagian depan plat penghalang dan meningkatkan kecepatan aliran fluida yang menumbuk sudu-sudu turbin sehingga menghasilkan selisih gaya drag yang lebih besar.

Gambar 4.19 dan Gambar 4.20 menunjukkan menunjukkan kontur tekanan dan vektor kecepatan aliran fluida yang melewati turbin angin Savonius tanpa plat penghalang pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ . Pada kondisi tanpa plat penghalang, aliran angin di sisi *returning blade* memiliki tekanan yang lebih tinggi dibandingkan dengan kondisi dengan plat penghalang. Akibatnya,

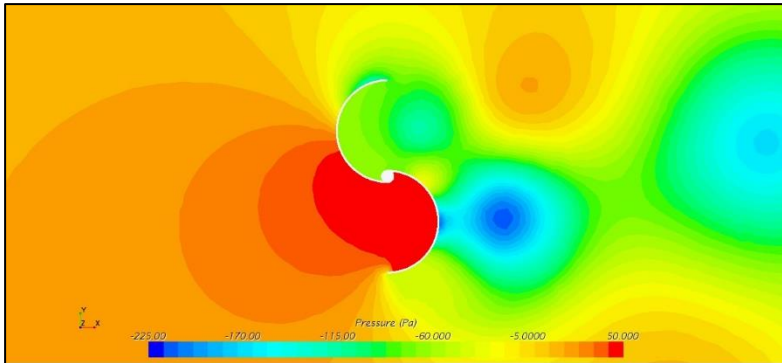
selisih gaya *drag* yang dihasilkan turbin menjadi lebih kecil dibandingkan dengan penambahan plat penghalang pada sudut  $\theta=90^\circ$ .



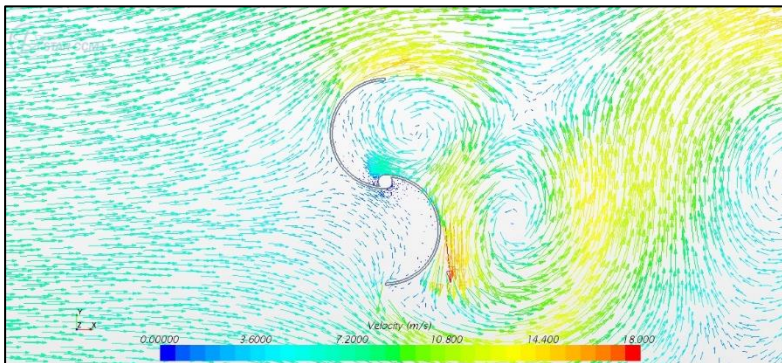
**Gambar 4.17** Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=90^\circ$  pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$



**Gambar 4.18** Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=90^\circ$  pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$



**Gambar 4.19** Kontur tekanan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius tanpa plat penghalang pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$

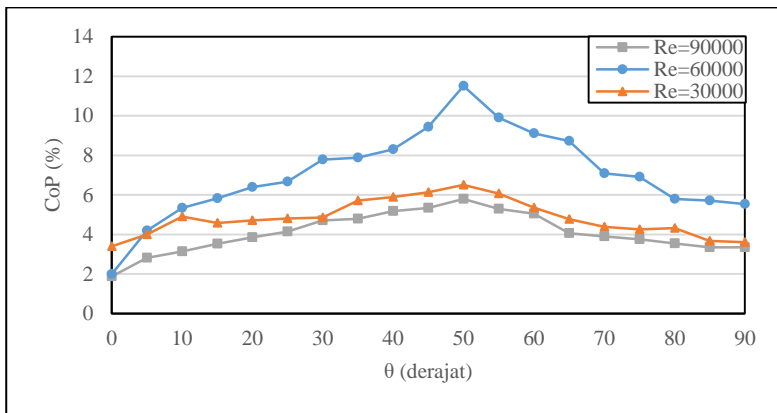


**Gambar 4.20** Vektor kecepatan aliran udara yang melalui turbin angin Savonius tanpa plat penghalang pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$

#### 4.4.3 Analisis *Coefficient of Power* Turbin Angin Savonius Dengan Penambahan Plat Datar Penghalang di Depan *Returning Blade*

Gambar 4.21 menunjukkan pengaruh sudut penempatan plat datar penghalang terhadap *coefficient of power* turbin angin Savonius (CoP). Nilai *coefficient of power* mengalami kenaikan

hingga mencapai sudut  $\theta=50^\circ$ . Kemudian, nilai *coefficient of power* mengalami penurunan hingga mencapai sudut  $\theta=90^\circ$ . Terlihat bahwa pada sudut penempatan plat penghalang yang sama, *coefficient of power* tertinggi diperoleh pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  diikuti oleh bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$  secara berurutan. *Coefficient of power* tertinggi diperoleh pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  sebesar 11,51% dan terendah pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 5,79%. *Coefficient of power* pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  berada di antaranya sebesar 6,50%. Nilai *coefficient of power* tertinggi pada masing-masing bilangan Reynolds diperoleh pada sudut  $\theta=50^\circ$ . Namun, terjadi penyimpangan pada sudut  $\theta=0^\circ$  dimana nilai *coefficient of power* pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  lebih kecil dari *coefficient of power* pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ .



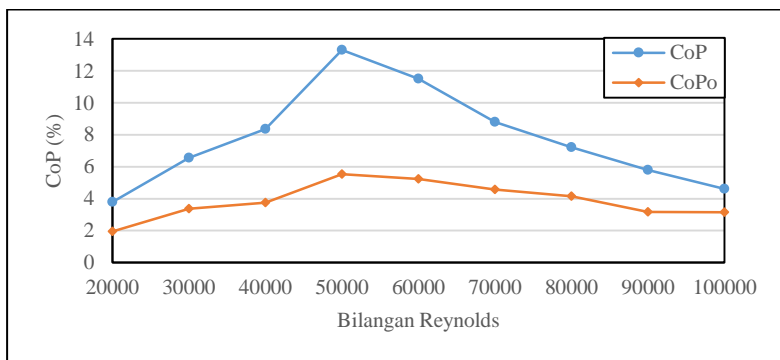
**Gambar 4.21** Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap *coefficient of power* turbin angin Savonius

Adanya plat penghalang di depan *returning blade* menyebabkan aliran menuju sisi *returning blade* tertahan oleh plat penghalang. Hal ini akan mengurangi gaya *drag* yang bekerja pada *returning blade* sehingga memperbesar torsi dan kecepatan putar turbin. Penambahan sudut penempatan plat penghalang



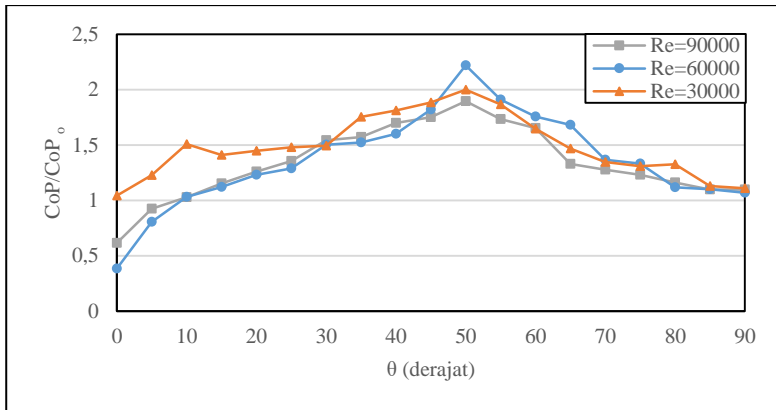
mempengaruhi aliran udara menuju *advancing blade* dimana aliran udara akan diarahkan menuju *advancing blade* dan mengalami peningkatan kecepatan. Hal ini menyebabkan daya kinetis udara yang diterima oleh turbin angin Savonius meningkat seiring peningkatan kecepatan aliran udara. Hal ini terjadi pada peningkatan sudut penampatan plat penghalang  $\theta=0^\circ$  hingga  $\theta=50^\circ$ . Dengan meningkatnya daya kinetis tersebut turbin juga mengalami peningkatan daya mekanis turbin sesuai dengan persamaan (2.6) dan (2.8).

Fenomena pada sudut  $\theta=0^\circ$  dimana nilai *coefficient of power* pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  bernilai lebih kecil dibanding pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  diakibatkan oleh adanya aliran udara yang menerobos bagian belakang plat penghalang menuju sisi *returning blade* yang disebabkan oleh *wake* yang terbentuk di ujung sisi plat penghalang. Akibatnya, terjadi kenaikan tekanan di belakang plat penghalang dan sebagian daya mekanis digunakan untuk melawan pengaruh tersebut. Hal ini menyebabkan daya mekanis yang dihasilkan berkurang dan nilai *coefficient of power* mengalami penurunan. Pada sudut  $\theta>0^\circ$ , aliran udara sudah diarahkan menuju *advancing blade* sehingga pengaruh aliran udara yang menerobos bagian belakang plat penghalang berkurang dan *coefficient of power* mengalami peningkatan.



**Gambar 4.22** *Coefficient of power* turbin angin savonius dengan dan tanpa plat penghalang pada beragam bilangan Reynolds

*Coefficient of power* tertinggi diperoleh pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$ . Hal ini disebabkan karena peningkatan daya mekanis turbin tidak sebanding dengan peningkatan daya kinetis dari udara seperti pada pembahasan sebelumnya. Nilai *coefficient of power* tertinggi diperoleh pada bilangan Reynolds  $5,0 \times 10^4$  sebesar 13,30%. Nilai *coefficient of power* pada beragam bilangan Reynolds ditampilkan pada Gambar 4.22.



**Gambar 4.23** Pengaruh sudut penempatan plat penghalang terhadap kenaikan nilai *coefficient of power* turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa plat penghalang

Kenaikan nilai *coefficient of power* dengan dan tanpa plat penghalang disajikan dalam sebuah grafik pada Gambar 4.23. Nilai  $\text{CoP}/\text{CoP}_0$  mengalami peningkatan pada rentang  $\theta=0^\circ$  hingga  $\theta=50^\circ$ . Adapun nilai  $\text{CoP}/\text{CoP}_0$  tertinggi dicapai pada sudut  $\theta=50^\circ$  dengan bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dengan  $\text{CoP}/\text{CoP}_0$  sebesar 2,22 diikuti oleh bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  sebesar 2,00 dan bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 1,90 pada sudut yang sama. Pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$   $\text{CoP}/\text{CoP}_0$  bernilai kurang dari 1 pada sudut  $\theta=0^\circ$  dan  $\theta=5^\circ$ . Sedangkan pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  pada sudut yang sama, nilai

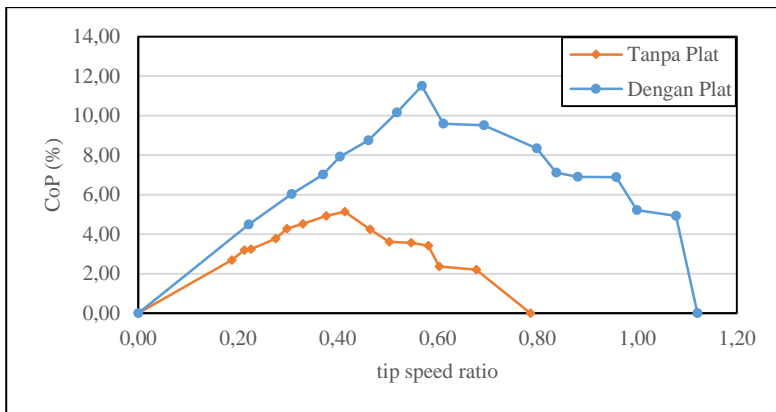


CoP/CoP<sub>0</sub> bernilai lebih dari 1. Pada sudut  $\theta=90^\circ$ , besar kenaikan *coefficient of power* hampir bernilai 1 di semua bilangan Reynolds, yaitu 1,11 pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ , dan 1,11 pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$ , dan 1,07 pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$ .

Pada penambahan plat dengan sudut  $\theta=0^\circ$ , CoP/CoP<sub>0</sub> bernilai kurang dari satu. Hal ini menunjukkan bahwa penambahan plat penghalang di depan *returning blade* pada sudut  $\theta=0^\circ$  menurunkan performa turbin angin Savonius dibandingkan dengan tanpa plat penghalang. Hal ini terlihat pada kontur tekanan pada Gambar 4.11 dan 4.19. Pada Gambar 4.19 terlihat bahwa perbedaan tekanan pada sisi *upstream* dan *downstream* dari *advancing blade* turbin angin Savonius tanpa plat penghalang sangatlah besar, hal ini ditunjukkan oleh kontur berwarna merah pada sisi *upstream* dan biru pada sisi *downstream*. Perbedaan tekanan yang signifikan menghasilkan gaya *drag* dan torsi yang signifikan pula pada *advancing blade*. Sedangkan pada konfigurasi plat di sudut  $\theta=0^\circ$ , perbedaan tekanan tidak seberapa dibanding tanpa plat penghalang. Akibatnya, performa turbin angin Savonius dengan penambahan plat pada sudut  $\theta=0^\circ$  lebih kecil dibanding tanpa plat penghalang. Hal ini ditunjukkan oleh CoP/CoP<sub>0</sub> yang bernilai kurang dari 1.

Turbin angin Savonius dengan penambahan plat penghalang memperoleh konfigurasi optimum pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $\theta=50^\circ$ . Pada kondisi ini, gaya *drag* pada sisi *advancing blade* jauh lebih besar dibandingkan dengan konfigurasi plat lainnya. Hal ini terlihat pada Gambar 4.13 dan Gambar 4.14 dimana aliran udara banyak diarahkan menuju *advancing blade* sehingga menghasilkan tekanan yang tinggi. Pada Gambar 4.13 terlihat bahwa daerah tekanan tinggi yang ditandai dengan warna merah menguasai wilayah *advancing blade* lebih luas dibandingkan dengan konfigurasi plat pada sudut  $\theta=0^\circ$ . Meskipun wilayah ini lebih kecil luasnya dibandingkan dengan konfigurasi tanpa plat, namun pada sudut  $\theta=50^\circ$  tidak terdapat wilayah bertekanan tinggi di depan *returning blade*. Hal sebaliknya terjadi

pada konfigurasi tanpa plat penghalang. Akibatnya, turbin akan menerima gaya *drag* yang melawan arah putaran pada konfigurasi tanpa plat dan menghasilkan *coefficient of power* yang lebih kecil. Secara umum, nilai  $CoP/CoP_0$  di semua sudut penempatan plat penghalang bernilai lebih dari 1 pada semua sudut penempatan plat penghalang di bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  dan pada sudut penempatan plat penghalang  $\theta > 5^\circ$  pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$ . Hal ini menunjukkan bahwa penambahan plat penghalang dengan rasio  $L/D=2$  mampu meningkatkan performa turbin angin Savonius pada sudut penempatan plat penghalang tertentu. Pada sudut penempatan plat penghalang mendekati sudut  $\theta=90^\circ$  kenaikan *coefficient of power* mendekati nilai  $CoP/CoP_0=1$  dikarenakan luasan sudu yang mengalami gaya *drag* pada posisi tersebut hampir sama seperti ketika tanpa plat penghalang. Akibatnya, gaya *drag* pada *returning blade* kembali muncul dan mengurangi selisih torsi yang dihasilkan turbin sehingga daya mekanis turbin berkurang yang menyebabkan penurunan nilai *coefficient of power*.



**Gambar 4.24** Pengaruh *tip speed ratio* terhadap *coefficient of power* turbin angin Savonius dengan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=50^\circ$  dibandingkan dengan tanpa plat penghalang pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$

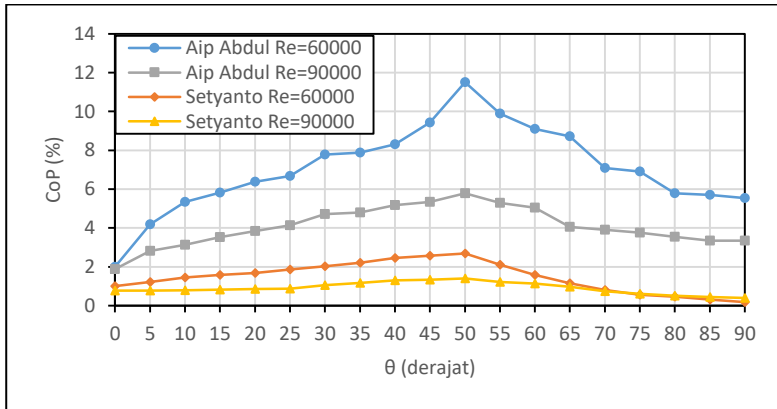
Gambar 4.24 menunjukkan pengaruh *tip speed ratio* terhadap *coefficient of power* pada turbin angin Savonius dengan dan tanpa plat penghalang. Data yang ditampilkan merupakan data pada saat nilai *coefficient of power* maksimum dicapai, yaitu pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan sudut penempatan plat penghalang  $\theta=50^\circ$ . Pada kondisi dengan plat penghalang, diperoleh nilai *coefficient of power* tertinggi sebesar 5,14% pada *tip speed ratio* sebesar 0,41. Sedangkan, pada kondisi dengan penambahan plat penghalang, nilai *coefficient of power* meningkat menjadi 11,51% pada *tip speed ratio* sebesar 0,57. Nilai *tip speed ratio* pada kondisi tanpa plat penghalang ialah sebesar 0,79 sedangkan pada kondisi dengan plat penghalang diperoleh nilai *tip speed ratio* maksimum sebesar 1,12.

Terlihat bahwa penambahan plat penghalang mampu meningkatkan performa turbin angin Savonius yang ditadai dengan peningkatan *tip speed ratio* dan *coefficient of power* maksimum. *Tip speed ratio* pada kondisi dengan plat penghalang meningkat dibandingkan dengan kondisi tanpa plat penghalang. Selain itu, penambahan plat penghalang juga mengubah bentuk kubah CoP vs TSR menjadi lebih besar sehingga daerah efisiensi *tip speed ratio* semakin luas dan *coefficient of power* meningkat. Artinya, dengan penambahan plat penghalang di depan *returning blade* turbin angin Savonius maka performa turbin juga akan meningkat.

#### 4.5 Komparasi Hasil Eksperimen Dengan Penelitian Sebelumnya

Komparasi hasil eksperimen dilakukan terhadap penelitian **Setyanto (2016)** yang memiliki rasio L/D sama, yaitu L/D=2. Gambar 4.25 menunjukkan perbandingan nilai *coefficient of power* pada penelitian ini dengan penelitian yang dilakukan **Setyanto (2016)** pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$ . Pada Gambar 4.25 terlihat bahwa nilai *coefficient of power* pada penelitian ini selalu lebih besar dibanding dengan penelitian yang dilakukan **Setyanto (2016)** pada bilangan Reynolds dan sudut penempatan plat yang sama. Adapun, nilai *coefficient of power*

tertinggi kedua penelitian diperoleh pada bilangan Reynolds dan sudut penempatan plat yang sama, yaitu pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $\theta=50^\circ$ . Bentuk kurva yang didapatkan pada penelitian ini juga cenderung memiliki kesamaan dengan penelitian sebelumnya dimana nilai *coefficient of power* mengalami peningkatan hingga mencapai sudut optimum  $\theta=50^\circ$  dan setelahnya mengalami penurunan hingga mencapai sudut  $\theta=90^\circ$ . Adapun *coefficient of power* tertinggi pada penelitian ini diperoleh sebesar 11,51% sedangkan pada penelitian **Setyanto (2016)** ialah sebesar 2,69%.



**Gambar 4.25** Perbandingan nilai *coefficient of power* hasil eksperimen dengan penelitian **Setyanto (2016)**

Dalam studi eksperimen ini terdapat beberapa persamaan dan perbedaan metode penelitian. Persamaan yang ada diantaranya rasio lebar plat penghalang terhadap diameter sudu turbin dimana nilai  $L/D$  sama-sama bernilai 2. Selain itu variasi sudut penempatan plat penghalang juga dilakukan pada rentang yang sama, yaitu  $\theta = 0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ , dan kenaikan tiap  $5^\circ$ . Kemudian, sebagian variasi bilangan Reynolds yang diujikan juga sama, yaitu  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$ . Adapun, perbedaan yang ada pada eksperimen ini meliputi metode pengukuran dan perhitungan daya,

jenis aliran yang digunakan, serta *aspect ratio* turbin angin Savonius yang diujikan. Adanya perbedaan-perbedaan tersebut memberikan kemungkinan terhadap hasil eksperimen yang berbeda dibandingkan hasil penelitian **Setyanto (2016)** dimana selisih nilai *coefficient of power* mencapai 8,82% pada nilai optimumnya.

Perhitungan *coefficient of power* pada eksperimen ini dilakukan dengan mengkalkulasi torsi dinamis dan kecepatan putar turbin sesuai persamaan (2.10). Pengukuran torsi dinamis dilakukan menggunakan *brake dynamometer* dan kecepatan putar turbin diukur menggunakan *tachometer*. Daya yang diperoleh pada eksperimen merupakan daya mekanis turbin sebelum dibangkitkan menjadi energi listrik. Sedangkan, pada penelitian **Setyanto (2016)**, pengukuran daya dilakukan dengan menghubungkan poros turbin ke generator kemudian daya listrik yang dibangkitkan generator dihitung dengan mengukur besar arus dan tegangannya. Adanya perbedaan metode tersebut memberikan kemungkinan terjadinya kerugian daya yang lebih besar pada penelitian **Setyanto (2016)** akibat banyaknya laluan kerugian daya yang dialami seperti kerugian pada *hub* antara poros turbin dengan generator dan kerugian listrik berupa hambatan yang digunakan pada rangkaian listrik.

Jenis aliran yang digunakan pada kedua penelitian juga memiliki perbedaan. Pada penelitian **Setyanto (2016)**, pengujian dilakukan dengan aliran internal di dalam sebuah *subsonic wind tunnel test section*. Namun, didapatkan bahwa besarnya rasio antara *frontal area* benda dan *test section* yang cukup besar, yaitu sebesar 24%. Adapun nilai ini telah melewati batas wajar dimana pada penelitian **Ian (2010)** disebutkan bahwa besarnya *blockage ratio* pada sebuah pengujian di dalam *wind tunnel* sebaiknya tidak melebihi nilai 10% karena dapat menyebabkan terjadinya *blockage effect*.

Perbedaan nilai *aspect ratio* juga memberikan pengaruh terhadap performa turbin angin Savonius. Dalam penelitian **Patil (2013)** didapatkan bahwa meningkatnya nilai *aspect ratio* akan

meningkatkan nilai *power coefficient* turbin angin Savonius. Turbin angin Savonius pada eksperimen ini memiliki dimensi 300 mm X 190,2 mm sehingga didapatkan *aspect ratio* sebesar 1,58. Sedangkan, turbin angin Savonius yang digunakan pada penelitian **Setyanto (2016)** memiliki dimensi 60 mm X 80 mm sehingga didapatkan *aspect ratio* sebesar 0,75. Hal ini sesuai dengan hasil penelitian **Patil (2013)** dimana pada studi eksperimen ini, *aspect ratio* turbin angin Savonius memiliki bernilai lebih besar dan diperoleh *coefficient of power* yang lebih besar pula.

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Dari pembahasan yang telah dilakukan, dapat diambil beberapa kesimpulan sebagai berikut:

1. Penggunaan plat datar penghalang dengan  $L/D=2$  di depan *returning blade* turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$ ,  $6,0 \times 10^4$ , dan  $9,0 \times 10^4$  dapat meningkatkan performa turbin angin Savonius pada rentang sudut di atas  $0^\circ$ . Hal ini ditandai dengan peningkatan nilai torsi statis (T), kecepatan putar turbin (n), dan *coefficient of power* (CoP) pada turbin angin Savonius dengan plat datar penghalang dibandingkan dengan turbin angin Savonius tanpa plat datar penghalang.
2. Torsi statis (T) terbesar diperoleh pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 11,24 Ncm pada sudut  $\theta=35^\circ$ . Pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  torsi statis terbesar diperoleh sebesar 3,98 Ncm pada sudut  $\theta=35^\circ$  dan pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  torsi statis terbesar diperoleh sebesar 1,23 Ncm pada sudut  $\theta=25^\circ$ .
3. Kenaikan nilai torsi statis dengan penambahan plat penghalang dibanding torsi statis tanpa plat penghalang ( $T/T_0$ ) terbesar dicapai pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  dengan  $T/T_0$  sebesar 3,45 diikuti oleh bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dan  $3,0 \times 10^4$  dengan  $T/T_0$  sebesar 3,26 dan 2,80 secara berurutan.
4. Kecepatan putar turbin (n) tertinggi untuk setiap bilangan Reynolds didapatkan pada sudut  $\theta=50^\circ$ , dengan nilai tertinggi pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 731,98 rpm. Pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  diperoleh nilai kecepatan putar turbin sebesar 560,32 rpm dan pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  sebesar 272,72 rpm.
5. Kenaikan kecepatan putar turbin dengan dan tanpa penghalang ( $n/n_0$ ) tertinggi dicapai pada sudut  $\theta=50^\circ$  pada

bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  dengan  $n/n_o$  sebesar 1,43 diikuti oleh bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  sebesar 1,32 dan bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 1,29 pada sudut yang sama.

6. *Coefficient of power* (CoP) tertinggi untuk setiap bilangan Reynolds diperoleh pada sudut  $\theta=50^\circ$ , dengan nilai *coefficient of power* tertinggi diperoleh pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  sebesar 11,51% dan terendah pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 5,79%. *Coefficient of power* pada bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  berada di antaranya sebesar 6,50.
7. Kenaikan nilai *coefficient of power* dengan dan tanpa penghalang (CoP/CoP<sub>o</sub>) tertinggi dicapai pada sudut  $\theta=50^\circ$  pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  sebesar 2,22 diikuti oleh bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  sebesar 2,00 dan bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$  sebesar 1,90.
8. Dengan dimensi turbin angin Savonius dan plat penghalang yang digunakan pada penelitian, kenaikan performa turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$  lebih tinggi dibandingkan dengan bilangan Reynolds  $3,0 \times 10^4$  dan  $9,0 \times 10^4$ .

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang diberikan terhadap penelitian yang telah dilakukan ini yaitu sebagai berikut:

1. Pengukuran torsi dinamis sebaiknya menggunakan alat ukur digital yang lebih akurat dan mudah dibaca.
2. Pengukuran torsi statis sebaiknya menggunakan alat ukur dengan *range* pembacaan yang sesuai karena besarnya torsi statis yang dihasilkan pada penelitian ini relatif kecil dibanding alat ukur yang digunakan.
3. Dimensi turbin angin Savonius yang digunakan dapat diperbesar untuk mendapatkan performa turbin yang lebih tinggi.



4. Perlu dilakukan studi numerik untuk menganalisis karakteristik aliran yang melalui turbin angin Savonius dengan dan tanpa plat penghalang.

*“ halaman ini sengaja dikosongkan ”*

## DAFTAR PUSTAKA

- Altan, B. D., M. Atilgan, dan A. Ozdamar. June 2008. "An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining". **Experimental Thermal and Fluid Science** 32, pp.1673–1678.
- Meadows, Donella, Jorgen Randers, dan Dennis Meadows. 2005. **Limits to Growth "The 30-Year Update"**. Earthscan.
- Mohamed, M. H., G. Janiga, E. Pap, D. Thevenin. May 2010. "Optimization of Savonius Turbines Using An Obstacle Shielding The Returning Blade". **Renewable Energy** 35, pp. 2618-2626.
- Patil, Sandeep. June 2013. "A Review Study on Savonius Wind Rotors for Accessing the Power Performance". **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, pp. 18-24.
- Prabowo, Susetyo Edi, dkk. 2016. **Handbook of Energy & Economic Statistics of Indonesia 2016**. Ministry of Energy and Mineral Resources Republic of Indonesia.
- Pritchard, Philip J., dan John C. Leylegian. 2011. **Fox and McDonald's Introduction to fluid Mechanics, Edisi 8**. John Wiley and Sons, Inc.
- Ragheb, Magdhi dan Adam M. Ragheb. 2011. **Wind Turbines Theory: The Betz Equation and Optimal Rotor Tip Speed Ratio** dalam Rupp Carriveau (Ed). **Fundamental and Advanced Topics in Wind Power**. InTech.
- Ross, Ian J. 2010. **Wind Tunnel Blockage Corrections: An Application to Vertical-Axis Wind Turbines**. University of Dayton.

- Setyanto, Muhtadi. 2016. **Studi Eksperimen Pengaruh Sudut Plat Pengganggu di Depan Returning Blade Turbin Angin Savonius Terhadap Peforma Turbin.** Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Sutherland, William. 1893. "The viscosity of gases and molecular force". **Philosophical Magazine Series 5**, pp 507-531.
- Wickert, Jonathan, and Kemper Lewis. 2013. **An Introduction to Mechanical Engineering, Edisi 3.** Cengage Learning.

## LAMPIRAN

### A. Performa turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds $3,0 \times 10^4$

$\theta$	n (rpm)	m (gr)	s (gr)	$\omega$ (rad/s)	COP (%)	CoP/CoP <sub>o</sub>	n max (rpm)	n/no	T (Ncm)	T/To
0	108,25	5	20	11,34	3,39	1,04	210,38	1,02	0,66	1,51
5	127,41	5	20	13,34	3,99	1,23	221,54	1,07	0,77	1,75
10	123,59	6	25	12,94	4,91	1,51	228,37	1,10	0,90	2,04
15	115,47	6	25	12,09	4,58	1,41	231,48	1,12	0,97	2,20
20	118,48	6	25	12,41	4,70	1,45	233,49	1,13	1,13	2,58
25	121,19	6	25	12,69	4,81	1,48	236,20	1,14	1,23	2,80
30	122,26	6	25	12,80	4,85	1,49	237,27	1,15	1,12	2,55
35	118,73	7	30	12,43	5,71	1,76	243,80	1,18	1,00	2,28
40	122,62	7	30	12,84	5,89	1,81	257,96	1,25	1,00	2,28
45	127,51	7	30	13,35	6,13	1,89	262,85	1,27	0,97	2,20
50	135,34	7	30	14,17	6,50	2,00	272,72	1,32	0,94	2,13
55	126,40	7	30	13,24	6,07	1,87	260,74	1,26	0,78	1,78
60	111,54	7	30	11,68	5,36	1,65	246,99	1,19	0,71	1,61
65	120,18	6	25	12,59	4,77	1,47	235,19	1,14	0,65	1,49
70	110,42	6	25	11,56	4,38	1,35	225,20	1,09	0,58	1,32
75	107,31	6	25	11,24	4,26	1,31	222,09	1,07	0,54	1,23
80	108,71	6	25	11,38	4,32	1,33	213,49	1,03	0,54	1,22
85	117,19	5	20	12,27	3,67	1,13	211,78	1,02	0,50	1,15
90	115,08	5	20	12,05	3,61	1,11	209,67	1,01	0,48	1,10

B. Performa turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds  $6,0 \times 10^4$

$\theta$	n (rpm)	m (gr)	s (gr)	$\omega$ (rad/s)	COP (%)	CoP/C oPo	n max (rpm)	n/no	T (Ncm)	T/To
0	152,47	30	80	15,97	1,99	0,38	299,85	0,76	2,14	1,75
5	186,92	35	120	19,57	4,18	0,81	362,93	0,92	2,48	2,03
10	215,21	35	130	22,54	5,34	1,03	401,22	1,02	2,90	2,38
15	234,45	35	130	24,55	5,82	1,12	420,53	1,07	3,12	2,56
20	222,22	40	150	23,27	6,38	1,23	431,66	1,10	3,20	2,62
25	232,32	40	150	24,33	6,67	1,29	441,76	1,12	3,24	2,66
30	248,51	40	160	26,02	7,79	1,50	475,95	1,21	3,66	3,00
35	251,62	40	160	26,35	7,89	1,52	481,13	1,22	3,98	3,26
40	244,45	40	170	25,60	8,30	1,60	491,96	1,25	3,62	2,97
45	249,03	45	190	26,08	9,43	1,82	527,13	1,34	3,24	2,66
50	284,22	45	200	29,76	11,51	2,22	560,32	1,43	3,02	2,48
55	261,34	45	190	27,37	9,90	1,91	541,44	1,38	2,37	1,94
60	258,21	45	180	27,04	9,10	1,76	516,01	1,31	2,28	1,87
65	256,82	40	170	26,89	8,72	1,68	497,07	1,26	2,11	1,73
70	226,00	40	160	23,67	7,08	1,37	454,05	1,16	1,76	1,44
75	220,47	40	160	23,09	6,91	1,33	448,22	1,14	1,64	1,34
80	211,25	35	140	22,12	5,79	1,12	414,89	1,06	1,58	1,30
85	208,13	35	140	21,80	5,71	1,10	408,77	1,04	1,44	1,18
90	202,01	35	140	21,15	5,54	1,07	396,65	1,01	1,38	1,13

C. Performa turbin angin Savonius pada bilangan Reynolds  $9,0 \times 10^4$

$\theta$	n (rpm)	m (gr)	s (gr)	$\omega$ (rad/s)	COP (%)	CoP/C oPo	n max (rpm)	n/no	T (Ncm)	T/To
0	277,78	50	130	29,09	1,88	0,62	502,33	0,88	6,80	2,09
5	304,64	40	160	31,90	2,82	0,92	543,52	0,96	7,82	2,40
10	290,76	70	210	30,45	3,14	1,03	569,82	1,00	8,78	2,69
15	285,55	70	230	29,90	3,52	1,15	585,98	1,03	9,30	2,85
20	293,71	70	240	30,76	3,85	1,26	599,72	1,06	9,82	3,01
25	315,88	70	240	33,08	4,14	1,36	615,55	1,08	9,96	3,06
30	359,39	70	240	37,64	4,71	1,54	635,99	1,12	10,44	3,20
35	345,61	70	250	36,19	4,80	1,57	656,1	1,16	11,24	3,45
40	373,56	70	250	39,12	5,18	1,70	676,1	1,19	10,64	3,26
45	346,47	80	280	36,28	5,34	1,75	701,87	1,24	9,56	2,93
50	375,57	90	290	39,33	5,79	1,90	731,98	1,29	8,92	2,74
55	343,34	90	290	35,95	5,29	1,74	686,84	1,21	7,12	2,18
60	363,51	70	250	38,07	5,04	1,65	666,74	1,17	6,40	1,96
65	309,28	70	240	32,39	4,05	1,33	617,58	1,09	5,76	1,77
70	297,74	70	240	31,18	3,90	1,28	612,04	1,08	5,18	1,59
75	286,81	70	240	30,03	3,76	1,23	601,16	1,06	4,76	1,46
80	287,74	70	230	30,13	3,55	1,16	601,16	1,06	4,22	1,29
85	271,86	70	230	28,47	3,35	1,10	585,28	1,03	3,94	1,21
90	271,90	70	230	28,47	3,35	1,10	579,4	1,02	3,82	1,17

D. Performa turbin angin Savonius pada beragam bilangan Reynolds dengan konfigurasi plat optimum

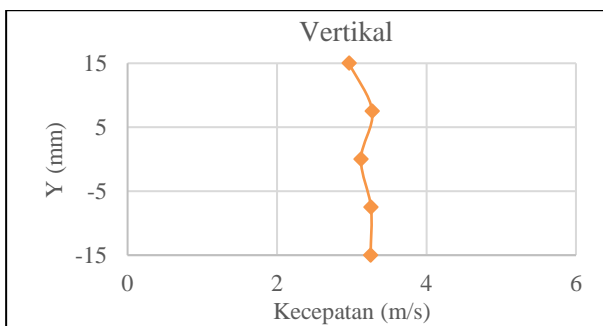
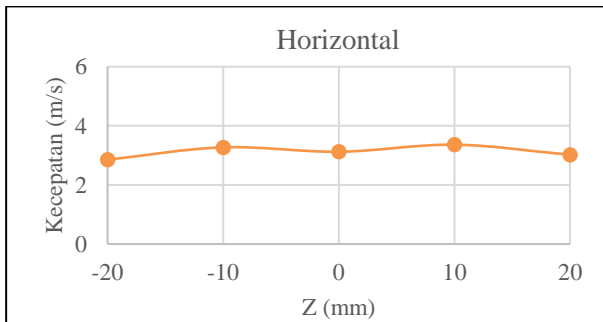
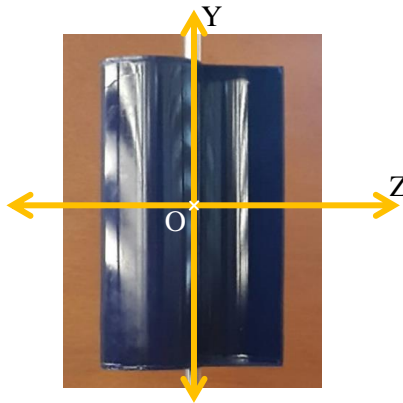
Bilangan Reynolds	n (rpm)	m (gr)	s (gr)	$\omega$ (rad/s)	COP (%)	CoP max tanpa plat	CoP/CoP0
20000	105,81	5	10	11,08	3,80	1,95	1,95
30000	135,34	7	30	14,17	6,50	3,37	1,93
40000	170,69	25	80	17,87	8,35	3,75	2,23
50000	244,86	40	160	25,64	13,36	5,53	2,41
60000	284,22	45	200	29,76	11,51	5,24	2,20
70000	302,67	55	230	31,70	8,80	4,56	1,93
80000	360,64	60	240	37,77	7,22	4,15	1,74
90000	375,57	90	290	39,33	5,79	3,17	1,83
100000	385,62	110	320	40,38	4,62	3,15	1,47



- E. Torsi statis turbin angin Savonius pada beragam bukaan sudut sudu turbin ( $\alpha$ ) dengan penambahan plat penghalang

$\alpha$	Bilangan Reynolds			Sudut Plat	Bilangan Reynolds		
	30000	60000	90000		30000	60000	90000
0	1,50	4,20	11,24	95	0,30	0,70	1,90
5	1,40	3,90	10,34	100	0,50	1,40	3,82
10	1,30	3,50	9,36	105	0,90	2,40	6,41
15	1,20	3,40	9,08	110	1,14	3,00	8,10
20	1,20	3,30	8,82	115	1,50	4,10	10,90
25	1,10	3,10	8,40	120	1,60	4,40	11,80
30	1,10	3,00	7,96	125	1,60	4,50	12,10
35	1,00	2,70	7,18	130	1,80	4,90	13,20
40	0,90	2,40	6,42	135	2,00	5,60	14,90
45	0,80	2,20	5,88	140	2,30	6,30	16,90
50	0,70	2,00	5,32	145	2,20	6,10	16,30
55	0,60	1,60	4,37	150	2,10	5,80	15,50
60	0,50	1,30	3,42	155	2,00	5,60	14,90
65	0,42	1,10	3,06	160	2,00	5,40	14,60
70	0,42	1,00	2,72	165	1,80	4,90	13,10
75	0,30	0,90	2,32	170	1,70	4,80	12,80
80	0,30	0,70	1,92	175	1,70	4,70	12,60
85	0,22	0,60	1,66	180	1,60	4,50	11,86
90	0,22	0,50	1,40				

- F. *Uniformity test* aliran fluida pada sisi *upstream* turbin angin Savonius



## BIODATA PENULIS



Aip Abdul Latip merupakan putra kelima dari pasangan Aripin Syarifuddin dan Aat Supiati. Penulis dilahirkan di Jakarta pada 7 Januari 1995. Sejak lahir hingga menyentuh umur 18 tahun, penulis tinggal dan mengenyam pendidikan di tanah kelahirannya. Madrasah tempat penulis sempat mengenyam ilmu diantaranya TK Islam Al-Kautsar, SDN Cipinang Melayu 10 Pagi, SMPN 109 Jakarta, dan SMAN 61 Jakarta. Lulus dari bangku SMA, penulis melanjutkan pendidikannya di Departemen Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya.

Selama 4 tahun masa studinya di dunia kampus, penulis menyempatkan untuk turut aktif dalam pengembangan diri baik dalam bidang akademik maupun non-akademik. Penulis aktif menjadi asisten praktikum pada Laboratorium Mekanika dan Mesin Fluida untuk 2 periode. Penulis juga aktif dalam kegiatan kemahasiswaan dengan mengabdikan diri ke dalam Himpunan Mahasiswa Mesin selama 2 periode, masing-masing sebagai staf dan kepala Departemen Hubungan Luar. Penulis juga berkesempatan untuk melakukan kerja praktik di PT. VICO Indonesia selama satu bulan dan bersyukur atas pengalaman dan ilmu yang didapatkan.

Penulis berpandangan bahwa selama bumi berputar dunia akan terus mengalami perubahan, dari terang menjadi gelap, dari muda menjadi tua, dari ada menjadi tiada. Namun, satu hal yang tidak akan pernah berubah ialah perubahan itu sendiri yang akan terus ada. Untuk itu penulis tak pernah takut untuk menghadapi tantangan dan perubahan di dalam hidupnya untuk menjadi pribadi yang lebih baik lagi.

*hubungi saya di:*  
*aipabdul95@gmail.com*  
*+62 877 6096 8230*